

Trabajo de fin de grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño Conceptual de un Monociclo Eléctrico

MEMÒRIA

Autor: Eloy Roy Brusi
Director: Emilio Angulo Navarro
Convocatòria: Gener 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En este proyecto se plantea el desarrollo conceptual de un monociclo eléctrico que más allá de ser un artículo de ocio, sirva para desplazarse en un entorno urbano. Dado que el diseño completo de un vehículo es un proyecto de gran envergadura, se proponen las bases para fabricar un prototipo investigativo, que servirá para estudiar la dinámica del monociclo a fin de conseguir una asistencia inteligente del motor y la auto-estabilización.

Se hace una breve introducción sobre el uso actual del monociclo, así como se muestra también el estado del arte de productos similares, destacando que es algo que todavía no se ha probado (o al menos no hay constancia de ello en internet).

Por la naturaleza innovadora del proyecto, se barajan varios conceptos y alternativas referentes a la disposición de los elementos clave del monociclo.

El grueso de este trabajo está en diseño mecánico, tanto las piezas modeladas en 3D con SolidWorks, como los componentes comerciales obtenidos de catálogos web.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	2
1. PREFACIO	5
1.1. Origen del proyecto.....	5
1.2. Motivación y justificación.....	5
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Objetivo del proyecto	7
2.2. Sub-objetivo: Prototipo investigativo	7
2.3. Alcance del proyecto.....	7
2.4. Planificación temporal.....	8
3. ESTADO DEL ARTE	9
3.1. Estudio de mercado	10
3.2. Normativa.....	16
4. DISEÑO CONCEPTUAL	17
4.1. Especificaciones Básicas.....	17
4.2. Alternativas planteadas.....	18
4.2.1. Rueda	19
4.2.1.1. Hubless Wheel:	19
4.2.1.2. Rueda Convencional	20
4.2.2. Motor.....	20
4.2.2.1. Tipologías de motor.....	20
4.2.2.2. Arquitecturas de motor	23
4.2.3. Modalidad de la asistencia	28
4.2.3.1. Asistencia en bicicletas eléctricas	28
4.2.3.2. Interfaz usuario-control.....	29
4.3. Selección del concepto	30
4.4. Propuesta de funcionamiento	31
4.5. Componentes.....	32
4.6. Búsqueda de Componentes	33
4.6.1. Motor.....	33
4.6.2. Transmisión	37
4.6.3. Batería	38
4.6.4. Cargador externo	43

4.6.5. Rodamientos.....	45
4.6.1. Pedales.....	46
4.6.2. Rueda	46
4.6.3. Sillín	47
4.7. Electrónica	48
4.7.1. Arduino.....	48
4.7.2. DC DC.....	50
4.7.3. Giróscopo.....	51
4.7.4. Acelerador.....	52
4.8. Diseño de piezas	53
4.8.1. Caja de la batería.....	53
4.8.1. Abrazadera motor-reductor	55
4.8.2. Soporte horquilla-batería-motor	57
4.8.3. Protector plato.....	59
4.8.4. Bielas	60
4.8.5. Platos	61
4.8.1. Horquilla.....	62
4.8.2. Encaje de la rueda	62
4.8.3. Luz Frontal	63
4.9. Estimación de las especificaciones obtenidas.....	64
5. PRESUPUESTO	66
6. IMPACTO AMBIENTAL	68
6.1. Introducción	68
6.2. Impacto de la fabricación	68
6.2.1. Materiales:	68
6.3. Impacto del uso.....	69
6.4. Corrección del impacto	69
CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	73
Referencias bibliográficas	73
Bibliografía complementaria	75

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

La idea de este proyecto surgió viendo la proliferación de los vehículos eléctricos unipersonales como monociclos o patinetes. Por una parte, parece una buena solución a la movilidad además fácilmente combinable con otros transportes. Por otra parte, a menudo éstos promueven un modelo de vida muy sedentario, ya que no requieren el esfuerzo humano para funcionar. Por eso, creo que el concepto de bicicleta eléctrica, que combina actividad física y la comodidad del motor eléctrico, podría ser aplicado al monociclo, uno de mis pasatiempos.

1.2. Motivación y justificación

Tomando como ejemplo Barcelona, la movilidad dentro de la ciudad sigue siendo un asunto con mucho por mejorar: los atascos diarios provocados por el exceso de coches y la saturación del transporte público en las horas punta provocan niveles de contaminación elevados y estrés para las personas que no consiguen llegar a tiempo a su trabajo. Es por eso por lo que últimamente los vehículos personales están ganando popularidad. Plataformas como Bicing permiten disponer de una bicicleta, convencional o eléctrica, casi en cualquier momento y lugar, siendo así muy fácil de combinar con el transporte público.

En una ciudad plana, sin elevaciones, los Vehículos de Tracción Humana (VTH) son una solución ideal para los desplazamientos de corta-media distancia. No obstante, como es el caso de Barcelona, las cuestas suelen disuadir a la gente de esta alternativa y es ahí donde la asistencia eléctrica toma importancia.

Si bien puede parecer un poco descabellado plantear el monociclo eléctrico como medio de transporte habitual en la ciudad, también lo parecían los patinetes años atrás y ahora es frecuente ver incluso personas mayores encima de ellos.

A veces la motivación surge simplemente para validar una idea o un concepto. A pesar de no obtener el resultado esperado, es posible desarrollar una tecnología que puede resultar útil para otro fin. Hay realmente poca diferencia entre el concepto que aquí se plantea y las futurísticas motos de una sola rueda que desde hace años se están estudiando.

El monociclo eléctrico va enfocado a un mercado joven, para un uso diario, recreativo, para alquileres turísticos, para ciudad, para campo... Actualmente existen muchas modalidades de monociclo: para acrobacias, descenso, rutas largas, etc. Claramente la inclusión de un motor

eléctrico podría ser bien recibida en para los que quieran subir montañas o recorrer distancias largas con él.

2. Introducción

2.1. Objetivo del proyecto

Tomando en consideración los vehículos eléctricos unipersonales pequeños que cada vez son más frecuentes en las ciudades, se diseña un monociclo que establezca un equilibrio entre la asistencia del motor y el esfuerzo humano, logrando así una autonomía no condicionada al agotamiento de la batería.

Por todo lo anterior, el objetivo final de este proyecto es diseñar un monociclo eléctrico, es decir, fusionar el concepto de monociclo convencional (como los de circo), con una asistencia inteligente que no solo proporcionaría un impulso extra, sino que también aportaría seguridad y estabilidad a su manejo.

Dada su enorme complejidad, en este proyecto no se profundiza sobre el sistema de auto estabilización. Por eso se plantea un sub-objetivo.

2.2. Sub-objetivo: Prototipo investigativo

A fin de probar y testear esta tecnología, el objetivo de este proyecto se centra en la fabricación de un prototipo que permita realizar pruebas sobre su viabilidad, facilidad de manejo y las distintas modalidades de asistencia. A modo conceptual se propone el marco teórico para desarrollar el software de estabilización. Además, en este prototipo se parte de la estructura convencional de un monociclo, por lo que sería muy fácil electrificar un monociclo ya existente.

2.3. Alcance del proyecto

Diseño conceptual:

- Mecánico: Diseño en detalle usando la herramienta SolidWorks 2017, considerando los métodos de fabricación a implementar.
- Electrónico: Esquema eléctrico, componentes.

Evaluación de la viabilidad:

- Análisis de mercado
- Posibles restricciones normativas

2.4. Planificación temporal

Inicialmente se plantea una previsión del desarrollo del proyecto. Finalmente, esta se modifica debido a la prórroga realizada en septiembre, quedando de la siguiente manera:

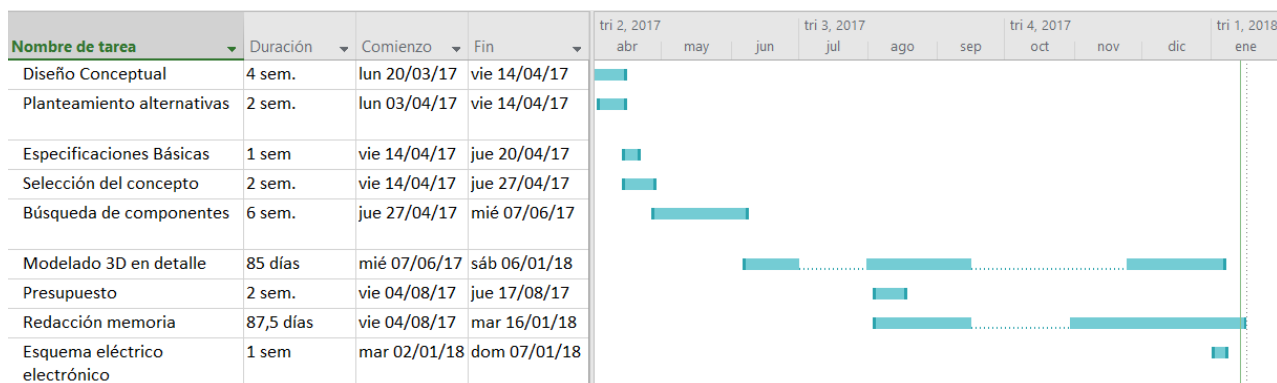


Ilustración 1 Diagrama de Gantt

Hay que tener en cuenta que prácticamente el mes de julio se hizo un parón por vacaciones, así como del 15 de septiembre hasta noviembre que se paró también por motivos laborales.

El carácter creativo de este proyecto ha provocado que la mayoría procesos se hayan realizado de manera iterativa, es decir, siguiendo modificaciones constantes en función de las nuevas variables que se introducen.

3. Estado del arte

Antes de empezar, definiremos que es un monociclo en su sentido tradicional. Según la wikipedia:

“El monociclo o unicycle es un vehículo de una sola rueda, y pedales como los de una bicicleta. Es requisito para todo moniciclista tener un buen equilibrio y dominio del centro de gravedad. Se dice del monociclo que es uno de los inventos más útiles para la ciudad ya que su reducido tamaño lo hace muy apto para los ciudadanos que viven en pisos, ya que es muy fácil de guardar y se puede usar como medio de transporte rápido y ligero. Asimismo, este medio transporte y de ocio ha servido desde hace tiempo como fuente de ingresos para diversa gente a través de demostraciones.”



Ilustración 2: Edd Pratt dando la vuelta al mundo en monociclo [1]

El usuario de un monociclo debe tener en cuenta que:

- El monociclo es de piñón fijo, por lo tanto, la velocidad queda limitada según el tamaño de la rueda.
- El equilibrio más difícil de conseguir es en la dirección de la marcha (cabeceo), que se controla con la fuerza aplicada a los pedales.
- El equilibrio lateral se consigue realizando pequeñas rotaciones de cadera durante la marcha, sumado a la fuerza centrípeta que proporciona la rotación de la rueda.
- Dado que se trata de un equilibrio inestable es imposible quedarse quieto encima del monociclo. Para quedarse en una posición fija es necesario realizar un vaivén adelante y atrás con pequeñas correcciones de cadera. Es una de las maniobras básicas más difíciles.

- La técnica para montar en el monociclo sin apoyo es colocarse el monociclo entre las piernas con un pie en el pedal, tomar impulso para conseguir una posición vertical, pedalear sutilmente hacia atrás para inclinar el cuerpo hacia delante y finalmente pedalear hacia delante.

Aunque parezca que los monociclos estén reservados ámbito del circo y tenga pocos adeptos, ya han surgido numerosas variantes y los usuarios no son precisamente pocos. Desde 1984 se celebra de forma bienal la convención mundial del monociclo “Unicon” que incluye competiciones artísticas en grupos, parejas o individuales, carreras de pista (100, 400, 800 metros), caminar la rueda por 30 metros, y 50 metros a un pie, la carrera de 10 kilómetros, la maratón, monociclismo de montaña y trial, hockey y baloncesto. Sin ir más lejos, la última edición se celebró el 2016 en San Sebastián y en ella participaron 1975 monociclistas de todo el mundo.

En las redes sociales se pueden encontrar comunidades como Unicycle Chat que suma 4751 miembros donde los practicantes comparten sus aventuras, dudas e inquietudes.

Como ejemplo de un atleta representativo tenemos a Edd Pratt que en su página de Facebook reúne ya 11 240 seguidores que le acompañan en su vuelta al mundo en un monociclo de rueda gigante (36”).

Está claro que no es un deporte mayoritario, pero es probable que implementarle un sistema de auto estabilización lo haga más atractivo para un público más perezoso.

3.1. Estudio de mercado

Para el estudio de mercado se clasifican los actuales productos existentes que tengan un diseño o función similar:

- Los monociclos clásicos, sin motor y sus diferentes variantes en función de su uso.
- Las motocicletas conceptuales de una sola rueda con apariencia futurística que llevan años en desarrollo pero que todavía no han llegado a comercializarse.
- Los vehículos pequeños unipersonales que en los últimos años han alcanzado bastante popularidad en las ciudades.
- También en auge el patinete y el skateboard motorizados, que ofrecen altas prestaciones y ocupan realmente muy poco, ideales para combinarlos con otros medios de transporte público.






Tipo	Ruedas	Descripción	Precio Medio (€)	Masa (kg)	Modelo	Imagen
Freestyle/ Hockey	20"	Clásico M. de circo, uso a nivel de suelo para trucos relativamente sencillos	200	5,4	Luxus Qu-Ax	
Trial /Street /Flat	20"	Estructura más robusta que permite dar saltos, bajar escalones y acrobacias más difíciles	300	6,5	Impact Gravity	
Montaña / Cross	20-36"	Ruedas más grandes con cubiertas todoterreno, estructura robusta resistente a grandes saltos y peso reducido. Existen modelos con freno incluso algunos con cambio de marchas.	450	6,5	Muni Q-Axle	
Carretera /Baloncesto	24-36"	Modelo optimizado para grandes desplazamientos, con ruedas muy grandes, también pueden incluir frenos y cambio de marchas al precio de 1800€. Para las carreras hasta se usan ruedas de menor grosor. Algún modelo dispone separadamente el eje del pedalier y el de la rueda.	650	7,5	Nimbus Oracle	
Jirafa	16, 20"	Destinado a la actividad de circo, cuentan con un sillín exageradamente elevado y una transmisión por cadena. Aunque a menudo se fabrican manualmente, los modelos comerciales llegan hasta una altura de 2,2m. Incluso existen modelos que en lugar de transmisión disponen varias ruedas en contacto.	280	10,8	Jirafa Triple Rueda	

Tabla 1 Monociclos convencionales sin motor [2]




Nombre	Ruedas	Motor	Velocidad Max	Precio	Imagen
Ryno	1 gruesa	Eléctrico	25mph	\$3500	
Bombardier Embrio concept	1 Grande y otra pequeña auxiliar	Eléctrico, con celda de combustible			
UNO Dicycle	2 coaxiales, se despliega como una quedando una motocicleta	Eléctrico			

Tabla 2: motocicletas conceptuales [3],[4],[5]

Nombre	Tipo	Ruedas [Ø, Ancho]	Motor	Velocidad Max	Precio (€)	Autonomía Batería	Masa (kg)	Imagen
Fastwheel N1	Hoverboard	2 coaxiales separadas	Dos motores eléctricos 700W total	15 km/h	434	20 km 170 Wh	10	
Fastwheel Monowheel	Monorueda	1 [12",2"] (hay versión con 2)	Eléctrico 400 W	20 km/h	627	15km 132Wh	9,3	
Xiaomi Ninebot One A1	Monorueda	1 [14",2"]	Eléctrico 500 W	18 km/h	424	15 km 155 Wh 4,3 V	12,5	
Gauswheel SPIRIT STAGE 3 BRAKE	Monorueda	2, grande y pequeña	Sin motor	Sin límite	179 239 349 449	-	9,6	

Nombre	Tipo	Ruedas [Ø, Ancho]	Motor	Velocidad Max	Precio (€)	Autonomía Batería	Masa (kg)	Imagen
Uno Bolt	Monorueda	1 [18", 10"]	Eléctrico 1000 W	35 km/h	999	40 km	20	
Fat One	Monorueda	1 [10", 15cm]	Eléctrico 500 W	30 km/h	685	40km 26V/343 Wh	13,6	
Segway i2 SE	Segway	2 coaxiales separadas Ø 47,7cm	Eléctrico	20 km/h	3.000	Autonom ía 40km	47,7	

Tabla 3: vehículos unipersonales auto estables ligeros [6]-[10]



Nombre	Tipo	Ruedas	Motor	Velocidad Max	Precio (€)	Autonomía a Batería	Masa (kg)
Original Xiaomi M365 Folding Electric Scooter	Scooter/ Patinete (Con E-ABS y KERS)	2 pequeñas, en línea	Eléctrico 250W	25 km/h	303	30km	
S-019 SHORT BOARD	Skateboard/ Monopatín	2 ejes de 2 ruedas pequeñas de goma	Eléctrico 400W	15 km/h	219	Autonomía 10km Batería: 55Wh	

Tabla 4: vehículos convencionales electrificados [11],[12]

De lo mostrado en primera tabla vemos que:

- La percepción habitual del monociclo es muy acotada (siempre se relaciona con el circo), pues vemos que han surgido numerosas disciplinas. El mercado objetivo no es tan reducido como pueda parecer.
- Algunas marcas han incorporado tecnologías complejas con un gran coste, como el cambio de marchas, con el objetivo de aportar más versatilidad.

De lo que vemos en la segunda tabla:

- Las Concept Moto de una sola rueda llevan muchos años en fase de experimentación. Es muy comprensible dado que cualquier normativa de circulación persigue ante todo la seguridad y resulta difícil pensar que un vehículo de una sola rueda pueda circular de manera segura a altas velocidades.

En la tercera:

- Todos ellos están muy limitados en la autonomía de la batería y prácticamente casi todos quedan inutilizados cuando se agota la batería.

En la última:

- El patinete y el monopatín sí podrían seguir usándose sin batería, pero con el incremento de peso y de resistencia pasiva que aportaría el sistema eléctrico. Los patinetes son los que más popularidad están ganando, ya que su símil sin motor acumula ya varios años de evolución y el hecho de tener manillar le aporta un control y seguridad que lo hace apto para personas menos hábiles.

3.2. Normativa

Dada la reciente aparición de los vehículos eléctricos unipersonales, no existe normativa específica que los regule, en tanto que no se consideran vehículos aptos para la vía pública. Por ello, esta competencia se deja a las autoridades locales.

Lo que sí necesitaría para su comercialización es el marcaje CE así como certificar la compatibilidad electromagnética

Tomando el caso de Barcelona, recientemente se ha aprobado una ley que regula el uso de estos aparatos en la ciudad. El documento los clasifica según peso, tamaño y velocidad máxima. El monociclo eléctrico entraría dentro de la siguiente categoría:

Categoría A – *En este grupo se incluyen los patinetes eléctricos individuales como uniciclos eléctricos y monociclos con una longitud máxima de un metro y un peso inferior a los 25 kilos que no alcancen los 20 kilómetros por hora como velocidad máxima.*

- Los vehículos de esta categoría solo pueden circular por el carril bici y dentro de parques o zonas peatonales a una velocidad inferior a 10 km/h.
- El uso de elementos reflectantes, luces y timbres es obligatorio para todos los grupos menos para el A.
- La edad mínima para conducirlos es 16 años.

4. Diseño Conceptual

4.1. Especificaciones Básicas

Las especificaciones son aquellos requisitos que se pretenden cumplir con el resultado de este proyecto. Tomando en consideración los siguientes datos:

Cadencia de pedaleo óptima	90rpm
Fuerza media de pedaleo humano:	300N
300N aplicados a un pedal de 16cm	48Nm
Potencia media de un ciclista profesional	250W
Potencia media de los motores de los dispositivos existentes	200W
Capacidad de la batería	170Wh

Tabla 5: datos relevantes

El producto final para comercializarse debería reunir las siguientes cualidades:

- Diseño estético, compacto, ligero, con una gran autonomía, seguro y fácil de usar.
- Modularidad: La potencia del motor, la capacidad de la batería, el tamaño de la rueda, el nivel de estabilización deberían ser características fácilmente modificables para alcanzar un mercado más amplio.
- Conectividad con el ordenador de abordo mediante una aplicación de Smartphone para controlar y ajustar el funcionamiento.
- Usabilidad: se debe poder considerar como un medio de transporte práctico para cortas distancias, más allá de ser un artículo de ocio.
- Tamaño de rueda de tamaño medio-grande para poder alcanzar cierta velocidad sin requerir una cadencia de pedaleo excesiva.
- Estabilización por control electrónico de lazo cerrado mediante sensores giroscópicos.

Para conseguir una autonomía superior a los modelos mencionados en el estudio de mercado, el sistema eléctrico tendrá unas características similares a las de los mismos. En

cuanto a las dimensiones físicas también se obtienen a partir de modelos estándar de monociclo:

Velocidad nominal	12,6 km/h
Velocidad máxima	25 km/h
Autonomía mínima	40 km
Potencia	300 W
Capacidad de la batería	170 Wh
Material de la Horquilla	Aluminio
Diámetro Horquilla	0,03 m
Tamaño de la rueda	26"
Distancia entre eje de la rueda y sillín	0,8
Distancia entre suelo y sillín	1,12 m
Longitud de las bielas	0,16 m
Masa total	12 kg
Luces	Frontal
Pedales	Plástico

Tabla 6: Especificaciones básicas

4.2. Alternativas planteadas

Puesto que se trata de un diseño conceptual, a lo largo del desarrollo se han planteado y descartado distintas alternativas para solucionar los requerimientos de cada sistema. Aunque este documento se centra en la fabricación de un prototipo investigativo, también se plantean algunas alternativas que no tendrían sentido implementar para realizar las primeras pruebas de funcionamiento pero que sí se podrían considerar para diseños más avanzados.

4.2.1. Rueda

4.2.1.1. Hubless Wheel:

Como alternativa a la rueda convencional se plantea la posibilidad una rueda sin eje, que sin duda aumentaría su atractivo por su apariencia futurística. Pero si esta tecnología no está extendida es porque requiere maquinaria muy precisa para su fabricación y por eso resulta muy cara. Además, requiere más mantenimiento por la exposición de los rodamientos.



Ilustración 3: Diseño conceptual de una bici con ruedas sin ejes ni radios [13]

A continuación, se muestra otro posible diseño para la integración del motor con los pedales sobre una rueda sin eje.

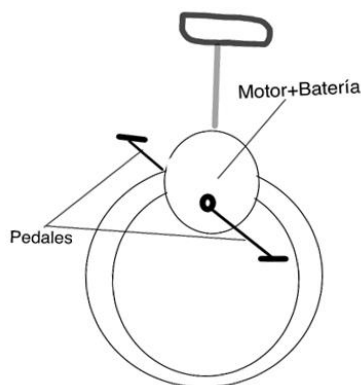


Ilustración 4: Esbozo del monociclo con rueda sin eje

4.2.1.2. Rueda Convencional

Se selecciona la arquitectura convencional de rueda, como una rueda de bicicleta, por su clara ventaja en cuanto a precio, implementabilidad y fiabilidad.

4.2.2. Motor

La estratégica colocación del motor es crucial en este proyecto. No hay duda de que la mejor solución sería incorporarlo en el mismo eje de la rueda para ahorrar el peso del sistema de transmisión. Sin embargo, con los motores más habituales resulta constructivamente imposible dado que, al ser piñón fijo, no hay un eje fijo al que sujetarlo.

El primer motor eléctrico se puso en marcha en 1834 y desde entonces han evolucionado muchísimo, derivando en un buen número de tipologías.

El principio fundamental en el que se basan todos ellos es la fuerza electromotriz generada por la interacción entre un campo magnético y el corriente eléctrico.

4.2.2.1. Tipologías de motor

A continuación, se hace un repaso de las tecnologías de motor existentes:

Motor de corriente alterna

Son muy comunes en los electrodomésticos y también para máquinas de aplicación industrial siempre requiriendo una toma de corriente de la red, ya sea monofásica o trifásica. Como la energía que proporcionan las baterías es en forma de corriente continua, no tiene sentido plantear este tipo de motores.

Se clasifican en:

- Universal
- Síncrono
- Asíncrono, (con bobinado o con jaula de ardilla).

En el caso de los motores asíncronos, por ejemplo, en el estator se encuentran las bobinas inductoras y el rotor puede ser un bobinado o de tipo jaula de ardilla. Si se trata de un motor trifásico, hay 3 bobinas por cada polo por las cuales circulan corrientes desfasadas 120° que generan un campo magnético rotativo entorno al rotor, lo que produce en él una tensión según la Ley de Faraday:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

El campo magnético giratorio, a velocidad de sincronismo, creado por el bobinado del estator, corta los conductores del rotor, por lo que se genera una fuerza electromotriz de inducción.

La acción mutua del campo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor, originan una fuerza electrodinámica sobre dichos conductores del rotor, las cuales hacen girar el rotor del motor. La diferencia entre las velocidades del rotor y el campo magnético se denomina deslizamiento.

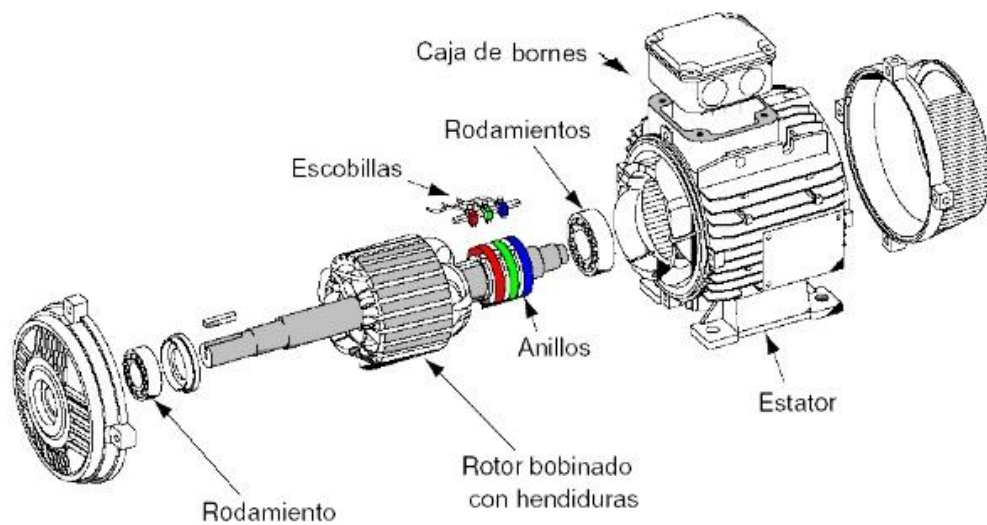


Ilustración 5: motor de corriente alterna [14]

Dado que la fuente de alimentación del motor es de corriente continua, se descartan automáticamente los motores de corriente alterno.

Motores DC

Los motores DC en su versión más sencilla constan de un rotor bobinado y un estator bobinado o de imanes permanentes. En estos motores la rotación del campo magnético se consigue mediante unas escobillas de grafito que invierten la polaridad de las bobinas. Debido a las escobillas actúan por rozamiento, generan ruido, pérdidas por calor, algunas chispas, y requiere mayor mantenimiento.

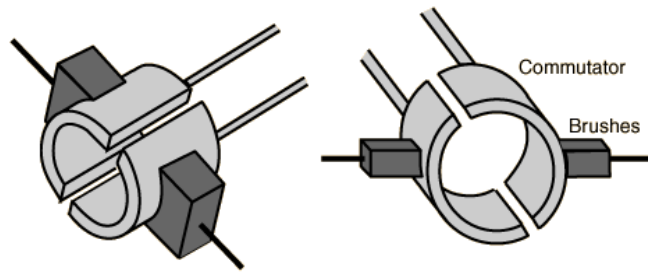
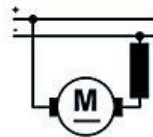


Ilustración 6: escobillas en un motor DC [15]

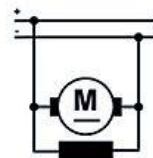
Se sabe que los puntos débiles de los motores con escobillas son el rápido desgaste y la eficiencia, por lo que llevan a un mayor mantenimiento.

Si el estator es bobinado, existen distintas configuraciones posibles para conectar los dos bobinados de la máquina:

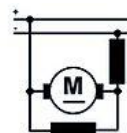
- Motor serie o motor de excitación en serie: el devanado de estator y el devanado de rotor se conectan en serie. Se encuentra en aplicaciones que requieren un gran par de arranque.



- Motor *shunt* o de excitación en paralelo: el devanado de estator y de rotor se conectan en paralelo. Su velocidad es casi independiente del voltage y la intensidad suministradas. Necesitan un motor auxiliar ya que el par de arranque es nulo. No es hasta una cierta velocidad que el motor es estable, es decir, capaz de contrarestar una reducción de la velocidad con un aumento del par.



- Motor de excitación compuesta o motor *compound*: se utiliza una combinación de ambas configuraciones.



- Motor de excitación independiente: El campo magnético del estator se produce con

electroimanes. Son poco frecuentes por su complicación.

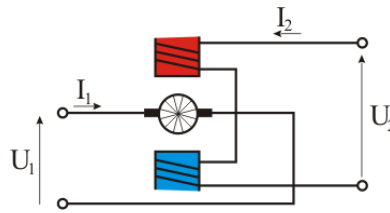


Ilustración 7: motores de continua [16]

Para las aplicaciones más simples se suelen usar los motores de **imanes permanentes**.

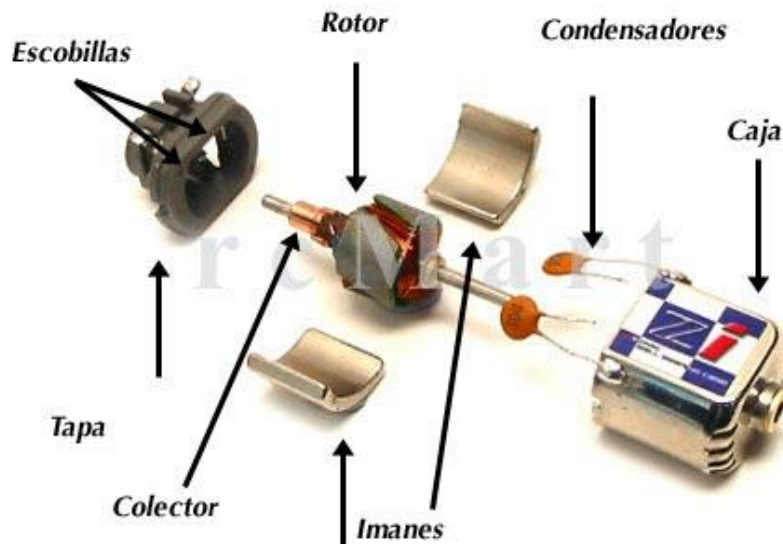


Ilustración 8: ejemplo motor pequeño de imanes permanentes [17]

4.2.2.2. Arquitecturas de motor

Motores de Flujo axial

Usualmente, desde los inicios, el flujo magnético de los bobinados tiene una dirección radial pero diferentes estudios han concluido que los motores de flujo axial alcanzan un rendimiento y un par mayores, lo que los hacen ideales para los vehículos eléctricos, cuya demanda de par es crucial a bajas velocidades. Usualmente estos constan de un “Sándwich” formado por dos capas de imanes permanentes en una disposición circular (rotor) y la capa del medio que contiene las bobinas (estator).

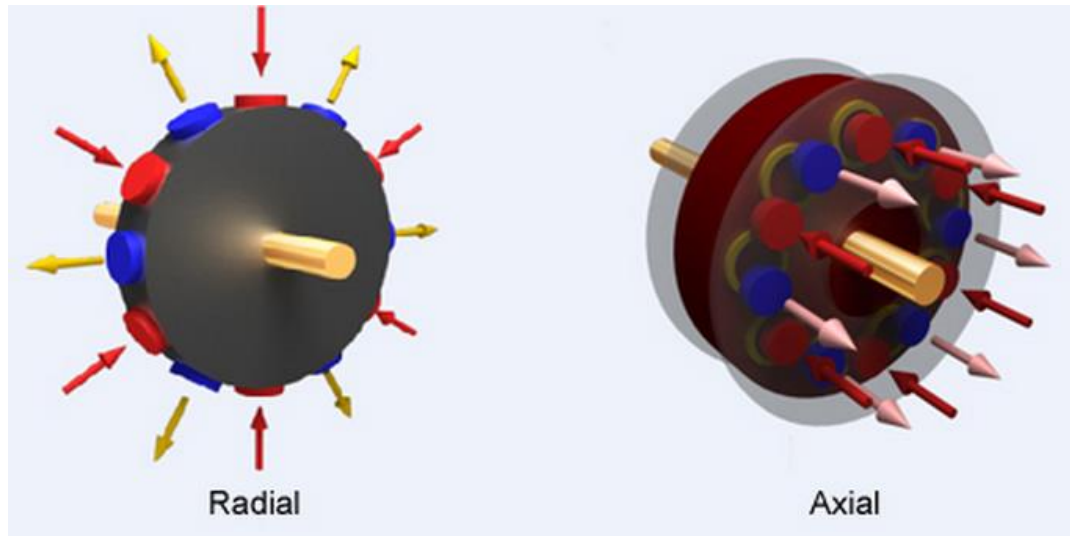


Ilustración 9: comparativa de los diferentes tipos de flujos magnéticos en los motores [18]

Su principal inconveniente es que al ser relativamente nuevo su fabricación todavía no se ha masificado y por eso su precio es mayor.

Algunos modelos de gran tamaño, como el motor Magnax que se muestra en la ilustración 9, cuentan con un rotor que está vacío. Aunque no se ha encontrado este tipo de construcción para motores DC más pequeños, podría ser una opción para poder acoplar el motor directamente en la rueda. Si bien para un prototipo no tiene sentido diseñar un motor a medida, de cara al futuro se puede diseñar un motor especialmente para el propósito, teniendo en cuenta el coste en desarrollo que esto tendría.

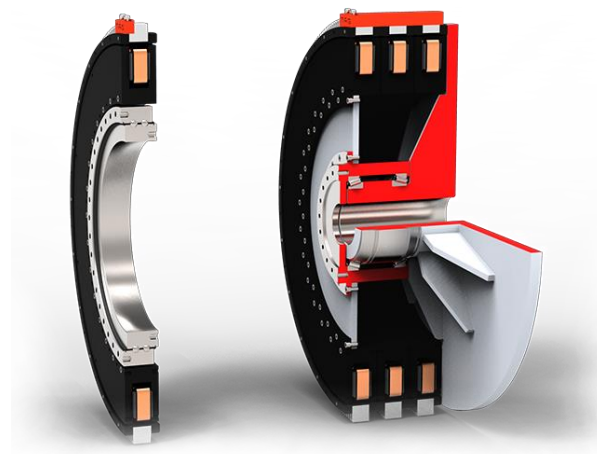


Ilustración 10: motor Magnax de flujo axial [19]

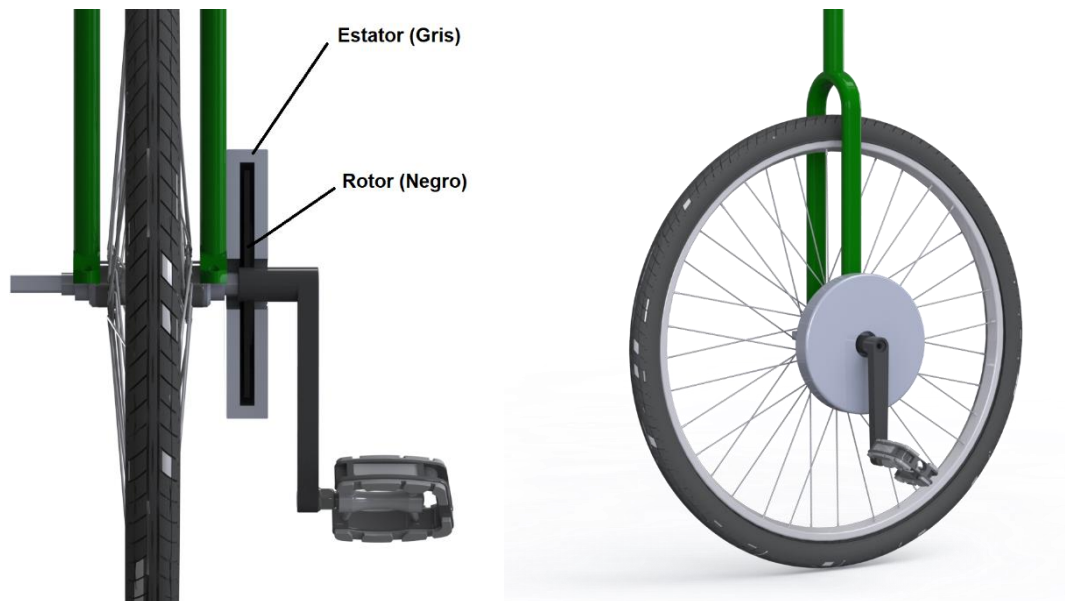


Ilustración 11: esbozos de un motor de flujo axial sin transmisión

En este caso el rotor, la capa intermedia, sería de imanes permanentes mientras que las bobinas se encontrarían en las capas exteriores, evitando así la necesidad de transferir corriente a la parte móvil. El motor se uniría lateralmente a la horquilla.

Frameless Motors (motores sin cuerpo)

Este tipo de motores están destinados a aplicaciones muy específicas y de alto rendimiento en las que el motor actúa directamente sobre el elemento móvil, motivo por el que son también caros y más difíciles de encontrar. Su objetivo es eliminar la necesidad del sistema de transmisión reduciendo así el peso y maximizando el rendimiento. Dada la alta densidad de energía que se da en los bobinados es usual también que incorporen un sistema de refrigeración por líquido. Dentro de ellos están los modelos de gran diámetro, que, por el mismo hecho de tener unos bobinados de gran tamaño, consiguen un mayor par.

Al mismo tiempo permite que el rotor pueda ser hueco, por lo que sería una solución perfecta para poder alojar el motor directamente dentro de la rueda con el eje del pedal travesando el hueco del rotor. El problema podría ser que un motor suficientemente corto (en el sentido axial) para caber dentro del eje de la rueda, probablemente no ofrecería un par suficiente.

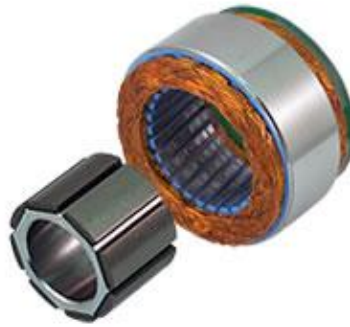


Ilustración 12: motor Frameless STD [20]

Motor Brushless (sin escobillas)

Los motores brushless o también llamados “BLDC motors”, sustituyen la conmutación mecánica de las escobillas por una conmutación electrónica, que no fue posible hasta el 1970 con los avances tecnológicos de los superconductores. Un sensor de posición como podría ser un encoder o un hall detectan la orientación del rotor respecto al estator y mediante transistores se alterna el corriente de las diferentes bobinas. Otro tipo de control del motor más complejo y eficiente es el **Pulse Width Modulation**, que consiste en transformar corriente continua en corriente alterna a partir de pulsos de tensión de magnitud fija y duración variable que generan una corriente eléctrica similar a una senoide, tal como se puede ver en la figura:

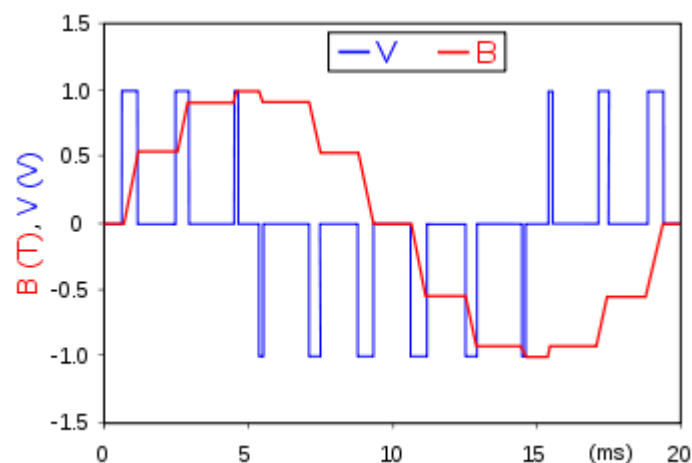


Ilustración 13: voltaje sinusoidal generado con PWM [21]

Las ventajas de los motores brushless son:

- Menor ruido acústico y electromagnético.

- Mayor eficiencia.
- Mayor durabilidad por no contar con el desgaste de las escobillas.
- Menor inercia del motor.

También presenta algunos inconvenientes:

- Mayor precio.
- Mayor complejidad del sistema de control.

Motor Hub

Los motores hub, aunque parezcan una tecnología reciente, también fue inventado hace muchos años, en el 1884. Su gran particularidad es que se alojan en el propio eje de la rueda, ahorrando así el peso y el coste del sistema de transmisión. Al contrario de la mayoría de motores, el estator, compuesto de los bobinados, se encuentra fijado al eje de la rueda y el rotor, de imanes permanentes, gira a su alrededor solidario a la rueda. La mayoría de ellos usan además la tecnología brushless, por lo que su rendimiento es muy alto.



Ilustración 14: motor Hub brushless del Keyde Conversion kit S230 [22]

En algunas motocicletas eléctricas incluso se han incorporado un tren de engranajes epicicloidales para aumentar su rango de trabajo:

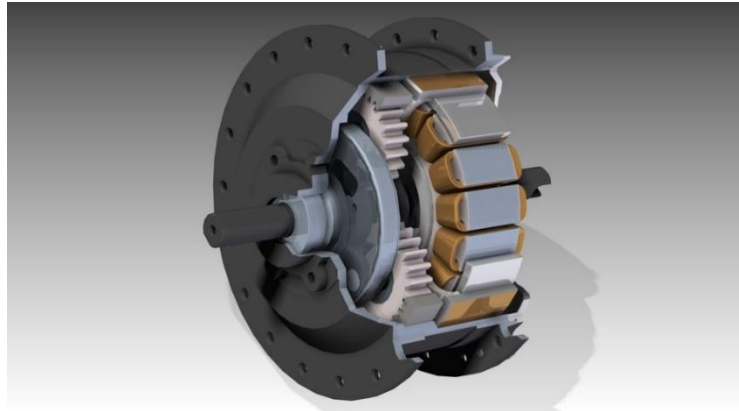


Ilustración 15: motor Hub con mecanismo de transmisión epicicloidal integrado [23]

Los motores hub tienen muchas ventajas: ocupan poco espacio, generan un par mayor y necesitan poco mantenimiento. Sus principales inconvenientes es que aumenta notablemente la masa no suspendida, es decir la masa que no percibe la acción de la suspensión, por lo que hace que el vehículo se adapte peor a terrenos irregulares.

Para el caso del monociclo, resulta constructivamente imposible incorporarlo porque no hay un eje fijo al que sujetarlo, dado que la rueda, el eje y los pedales son un mismo sólido que gira solidariamente.

4.2.3. Modalidad de la asistencia

Aunque en este documento no se defina un software de funcionamiento que consiga darle auto estabilidad al monociclo, se plantean las diferentes opciones para el sistema que lo pueda implementar. Teniendo en cuenta que, en su funcionamiento normal, es la habilidad del usuario la que lo mantiene en pie con movimientos rápidos y precisos, es evidente que se necesita un sistema de control PID de lazo cerrado. Para ello, los sistemas Arduino ofrecen una gran variedad de microcontroladores fáciles de programar e implementar ideales para el ámbito educativo.

4.2.3.1. Asistencia en bicicletas eléctricas

A modo ilustrativo, se describe brevemente la sensórica que utilizan las bicicletas eléctricas. Puesto que la normativa europea actualmente prohíbe que puedan funcionar como una moto, es decir, sin pedalear, requieren algún sensor que active la asistencia al pedaleo solo cuando el usuario padealea. Para activar la asistencia del motor se usan principalmente dos tipos de sensores:

- Sensor de cadencia: es el más extendido y económico, se basa en el efecto hall y mide sencillamente la velocidad de pedaleo, que determina la potencia eléctrica proporcionada. Su inconveniente es que el tiempo de respuesta es más alto.

- Sensor de par: miden directamente la fuerza ejercida en el eje del pedalier mediante unas galgas extensiométricas. De esta manera la potencia del motor es proporcional a la fuerza ejercida por el ciclista, lo que da una sensación muy realista de tener más fuerza. Su inconveniente principal es su mayor precio.

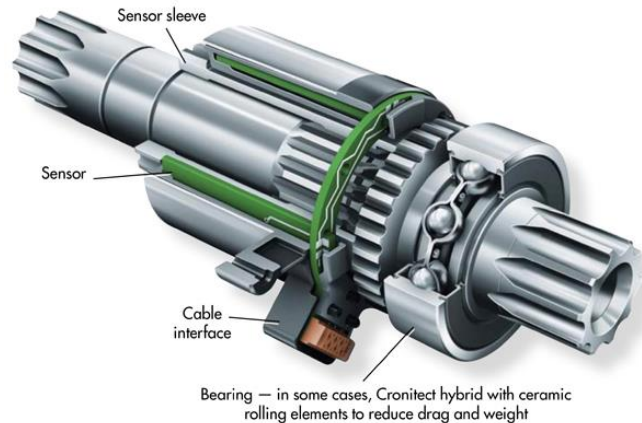


Ilustración 16: sensor de par para eje del pedalier [24]

4.2.3.2. Interfaz usuario-control

Independientemente de si el monociclo es auto estable, se requiere algún tipo de sensor que interprete las órdenes del usuario. La calidad de la asistencia marcará la experiencia del usuario y tendrá mucha repercusión en el éxito del producto. Así pues, las diferentes modalidades de asistencia que se proponen están directamente ligadas al tipo de sensor que emplean.

- Asistencia proporcional mediante sensor de par: en la geometría de un monociclo convencional resulta imposible la instalación del sensor de par como el de la ilustración anterior por el hecho que los pedales son solidarios a la rueda y no existe una cavidad cilíndrica donde colocar el soporte del mismo. Para hacerlo posible sería necesario desarrollar otra tipología de sensor, por ejemplo, uno que fuera capaz de medir la micro flexión producida en el pedal. Un sensor de par ofrecería la posibilidad de controlar el monociclo como si fuera normal, pero con una multiplicación de la fuerza empleada, que resultaría muy atractivo para quienes ya les guste ir en monociclo y lo usen por la montaña, por ejemplo Aunque no es incompatible, este sensor no sirve para implementar la auto estabilización.

- Asistencia constante: un aporte de par constante, como el que proporcionan las bicis eléctricas más básicas, sería el más fácil de implementar, pero realmente no ayudaría nada a equilibrar, incluso lo haría más difícil.

- Acelerador: un acelerador reostático basado en un potenciómetro se considera

una buena opción para realizar primeras pruebas de funcionamiento. No obstante, para que dé resultado, la señal analógica que éste emitiría debería ser combinado con el sistema de auto estabilización, ya que de lo contrario produciría un impulso motor difícil de equilibrar.

- Sensor giroscópico: como los dispositivos más pequeños comentados anteriormente, un sensor giroscópico de 6 ejes (acelerómetro de 3 ejes + giroscopio de 3 ejes) sería la única solución que permitiría la auto estabilización. Al mismo tiempo puede permitir al usuario dirigir el monociclo con la inclinación de su cuerpo, para que el motor avance o retroceda buscando el nuevo punto de equilibrio. La fuerza de pedaleo se consideraría entonces una perturbación en el sistema de control. Aunque no precisa de otro sensor, se podría combinar por ejemplo con un acelerador como el mencionado en el apartado previo.

4.3. Selección del concepto

Para el prototipo investigativo se propone el siguiente diseño. Vista la dificultad de integrar el motor dentro de la rueda, se opta por colocarlo por encima de esta. Para no aportar más inestabilidad al equilibrio se colocan los elementos de gran masa (tanto el motor como la batería) en el punto más bajo posible, al mismo tiempo también se distribuyen para mantener el centro de masa centrado.

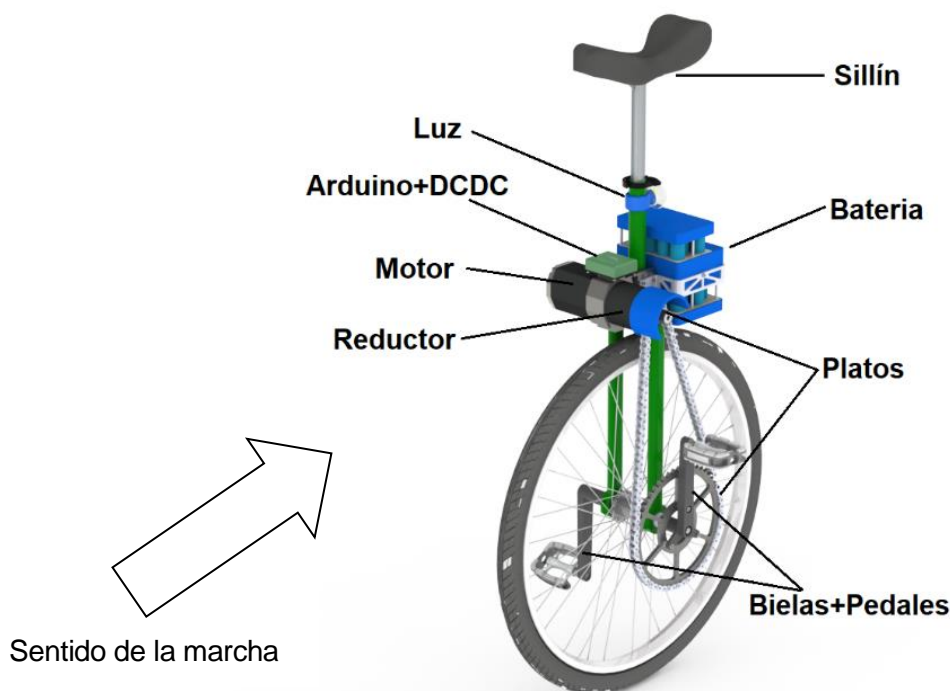


Ilustración 17: diseño propuesto

4.4. Propuesta de funcionamiento

El sistema de control implementado con Arduino permitirá un sencillo manejo de la siguiente manera:

- Una vez encendido y con el sistema de potencia listo, se encenderán las luces para indicar que está preparado.
- Para subirse, el usuario se colocará el monociclo entre las piernas (inclinándolo), y cuando esté preparado para montar, pulsará el botón que hará que el monociclo le ayude a erguirse.
- Una vez arriba, el funcionamiento es como el de un monociclo normal, con la asistencia añadida que proporciona el motor.
- Cuando el usuario quiera bajar, pulsará el botón, que llevará al monociclo a pararse en posición vertical, para a continuación facilitar el desmontaje del mismo con una lenta inclinación hacia delante.
- En caso de que el sistema detecte un choque con el suelo o batería baja, se activa el protocolo de descenso.

Además, el control inteligente proporcionará:

- Protección por Exceso de Velocidad
- Límite de Inclinación

Adicionalmente, para mejorar la experiencia del usuario se pueden introducir parámetros controlables, como, por ejemplo:

- La velocidad máxima, para los pilotos novatos.
- Nivel de ayuda, es decir, el grado en el que el sistema se auto equilibra. Un usuario experimentado quizás estaría interesado en que el motor solo proporcione una fuerza adicional sin necesariamente también asistir al equilibrio.

4.5. Componentes

El sistema se puede descomponer en la siguiente lista de componentes, algunos de los cuales se obtienen del mercado, y otros se diseñan mediante un software CAD.:

Mecánicos:

- Rueda
- Horquilla
- Sillín (con tallo)
- Plato y piñón
- Cadena
- Bielas y pedales
- Soporte motor y batería
- Reductor
- Protector del plato

Eléctrico

- Motor (con el driver integrado)
- Batería
- Cargador externo
- Sensor de Inclinación giroscópico de 6 ejes
- Arduino/Controlador
- Convertidor DC DC
- Luz

4.6. Búsqueda de Componentes

4.6.1. Motor

Para el dimensionamiento del motor, se toma la referencia de la gama media del dispositivo FastWheel Monowheel mencionado anteriormente, es decir, aproximadamente 300W. Para garantizar un sistema de balanceo robusto capaz de superar obstáculos con agilidad y seguridad, sabiendo que a baja velocidad el equilibrio es más difícil ya que no actúa la fuerza centrípeta de la rueda, se considera la fuerza media de pedaleo humano (300N), como referencia para el par que el motor debe desarrollar.

Aplicando esta fuerza a un pedal de 16cm:

$$300N \cdot 16cm = 48Nm$$

un par bastante elevado para una potencia de 200W, lo que nos impone incorporar un sistema reductor o bien un “Torque Motor”, es decir, un motor con una relación Par/Potencia especialmente alta.

Cabe también apuntar que un controlador PID preciso mantendría la inclinación acotada en pocos grados. Por lo que la potencia requerida sería mucho menor.

Tal como se ha comentado anteriormente, la colocación del motor sería idealmente en el interior de la rueda, evitando así la necesidad de un sistema de transmisión, bajando el centro de gravedad y en conclusión reduciendo la complejidad. Por otra parte, esto supondría un aumento de la complejidad en la propia rueda. Se han encontrado algunos modelos de motor frameless que se aproximan a los requerimientos, pero de cara a un prototipo investigativo se han descartado principalmente por 3 motivos:

- La mayoría de ellos son máquinas de alterna de gran tamaño.
- Los que se pueden encontrar de corriente continua no alcanzan el par necesario.
- La estructura rotor-estator no es la deseada.
- Su implementación sobre la rueda sería compleja y un punto crítico para el montaje.

A continuación, se muestran algunos “Torque motors” considerados para su implementación:

Motor McClennan HT5005 100VDC

Este es el motor tipo frameless DC comercial cuyas unas características se acercan a los requerimientos. Aun así, el par nominal resulta insuficiente para acoplarlo directamente en la rueda sin un sistema de transmisión.



Ilustración 18: motor frameless HT05005 McClennan [25]

Par Nominal	Nm	8,41
Par Máximo	Nm	61,00
Velocidad en Vacío	rpm	420
Potencia Nominal	W	665
Constante de Par	Nm/A	2,27
Inercia del rotor	kg-m ²	1,4E-3
Masa	kg	3,44

Tabla 7: especificaciones del motor McClennan HT05005

Motor Bei Kimco Frameless Brushless DC

Otro de los pocos motores frameless DC que se encuentran pero que ofrece unas prestaciones muy por debajo de los requerimientos de par.



Ilustración 19: motor Bei Kimco DIP38-22-001ª [26]

Tensión Nominal	V	50,4
Corriente Nominal	A	11,2
Par Nominal	Nm	3,05

Par Máximo	Nm	9,18
Potencia Nominal	W	565
Constante de Par	Nm/A	0,385
Masa	kg	2,1

Tabla 8: especificaciones del motor Bei Kimco

Por las grandes prestaciones y la facilidad de implementación se selecciona un servo motor tipo brushless con la controladora integrada, lo que permite el control del par mediante una señal de 5V.

Con el fin de mantener el centro de gravedad bajo y así facilitar el equilibrio, la colocación del motor y la caja reductora (que va acoplada al motor) será lo más baja posible. Es decir, justamente por encima de la rueda.

Debido a que la empresa Dunkermotoren está dedicada a componentes para aplicaciones industriales, no ha sido posible obtener el precio, por lo que se ha hecho una estimación en base a otros modelos que si aparecen en la red.

Dentro del catálogo se selecciona el modelo que ofrece la mayor relación de Par/Potencia.

Modelo seleccionado: BG 75X25 PI, 40V

Tensión Nominal	V	40
Corriente Nominal	A	8,3
Par Nominal	Nm	0,71
Velocidad Nominal	rpm	3820
Par de fricción en vacío	Nm	0,057
Peak stall torque?	Nm	2,50
Par Máximo	Nm	2,50
Velocidad en Vacío	rpm	4400
Potencia Máxima	W	415
Potencia Nominal	W	284

Constante de Par	Nm/A	0,115
Inercia del rotor	gm ²	0,024
Peso	kg	1,6
Dimensiones	mm	115x75x75

Ilustración 20: tabla de especificaciones [27]

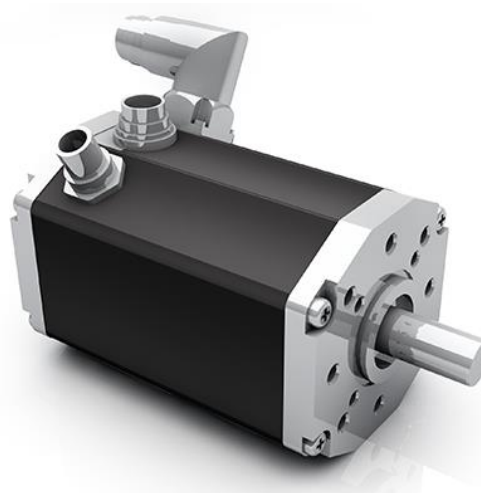


Ilustración 21: motor Dunkermotoren BG75x25 PI [27]

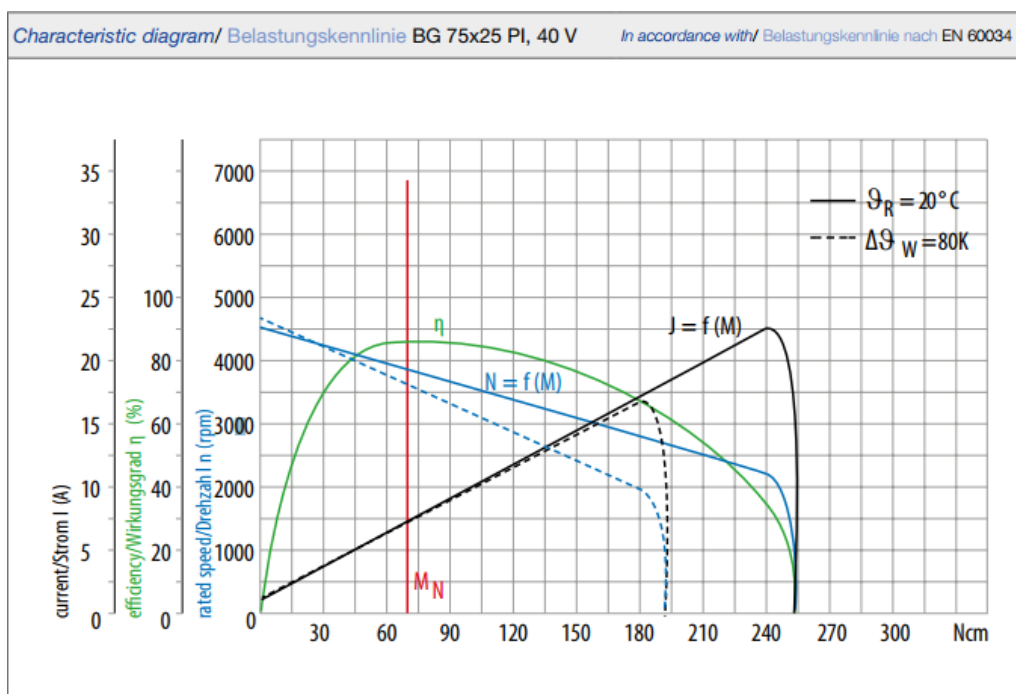


Ilustración 22: diagrama característico del motor [27]

4.6.2. Transmisión

El motor seleccionado implica la necesidad de un sistema de transmisión. Para calcular la R_t (relación de transmisión), se busca que el usuario pedalee en la cadencia óptima cuando el motor gira a su velocidad nominal:

$$\frac{3820 \text{ rpm}}{90 \text{ rpm}} = 42$$

Puesto que la geometría obliga a introducir un sistema de platos y cadena y la R_t es bastante elevada, se decide dividir equitativamente la R_t entre un reductor planetario de una sola etapa acoplado al motor y el sistema de platos y cadena. Es decir, que R_{t1} sea cercano a R_{t2} .

$$R_t = R_{t1} \cdot R_{t2} \quad R_{t1} \cong R_{t2} \quad R_{t1} \cong \sqrt{R_t} \quad R_{t1}, R_{t2} \cong 6,5$$

De esta manera, el par desempeñado por el motor en el eje de la rueda es aproximadamente (sin considerar el rendimiento):

Par Nominal	Nm	29,82
Par Máximo	Nm	105

Entre los reductores acoplables al motor seleccionado, que tengan una sola fase y una R_t cercana a 6,5, se selecciona el más ligero.

Modelo seleccionado: DunkerMotoren PLG 75LL, 7 : 1

Relación de transmisión		7 : 1
Número de fases		1
Par nominal de salida	Nm	6,00
Max. eficiencia	%	90
Masa	kg	1,5
Carga axial máxima	N	1000
Carga radial máxima	N	1000
Longitud	mm	80,2 195,2 acoplado al motor

Tabla 9: especificaciones del reductor seleccionado [28]

Para completar la transmisión, el sistema platos-cadena debe lograr una R_t de

aproximadamente 6. Al mismo tiempo, conviene seleccionar los componentes más pequeños para reducir el peso.

La medida más habitual en las bicicletas es **ISO 08B**. El plato más pequeño, pero suficientemente grande para encajar en el eje de salida del reductor es de 9 dientes, por lo que el plato inferior debe ser $6 \cdot 9 = 54$.

Magnitud	Unidades	Salida del Motor		Salida del reductor ($\eta=90\%$)		Eje de la rueda ($\eta=95\%$)
Par Nominal	Nm	0,71	$\mathbf{x\ 7 \cdot 0,90}$	4,47	$\mathbf{x\ 6 \cdot 0,95}$	25,50
Par Máximo	Nm	2,50		15,75		89,78

Tabla 10: cálculo de la Rt final

Respecto a los 48 Nm equivalentes a la fuerza de un ciclista, se obtiene un par de salida de pico (89,78 Nm) que casi lo dobla y que precisamente se da cuando la velocidad es mínima y por tanto el equilibrio es más difícil. El par nominal llega a la mitad de 48 Nm.

Podemos comprobar también que con la relación 7:1, cuando el motor proporcione el par nominal, el par de salida del reductor será $0,71 \cdot 7 \cdot 0,90 = 4,47 \text{ Nm}$, quedando así por debajo del límite de 6 Nm del reductor.

Resumiendo, el sistema de transmisión se compone la caja de cambio Dunkermotoren, con una $R_t=7:1$ combinado con el sistema de platos y cadena que tiene una $R_t=6:1$, quedando así la $R_t=42$ deseada inicialmente.

4.6.3. Batería

La batería es la encargada de suministrar energía en cualquier vehículo eléctrico. Es por lo tanto un elemento clave ya que determinará la autonomía y contribuirá en gran manera al precio. Dentro de las distintas tecnologías presentes en el mercado las más populares por sus características son las basadas en Litio, concretamente las de Li-ion y LiFePO_4 .

El principio de funcionamiento de cualquier batería se basa en las reacciones de reducción-oxidación (redox), un proceso químico reversible en el que uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones).

Batería	LiFePO ₄	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	Li(NiCo)O ₂
Seguridad	Segura	Inestable	Aceptable	Inestable
Contaminación medioambiental	La más ecológica	Muy contaminante		Muy contaminante
Durabilidad	Excelente	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Relación fuerza/peso/capacidad	Aceptable	Buena	Aceptable	La mejor
Costo a largo plazo	Excelente	Alto	Aceptable	Alto
Temperatura de trabajo	Excelente (-20C to 70C)	Decae más allá de (-20C to 55C)	Decae rápidamente a más de 50 C	-20C to 55C

Ilustración 23 Comparación de los diferentes tipos de batería con base de litio [29]

Se selecciona la tipología LiFePO₄, (litio ferrofosfato), aunque no tiene la mayor densidad de energía, es la que ofrece mejores condiciones a largo plazo, la más estable y segura ante sobrecarga o sobrecalentamiento. Cuenta con una gran ratio de descarga, necesario para las aceleraciones de cualquier vehículo eléctrico. Otra cualidad que la caracteriza es que el voltaje de descarga se mantiene casi constante en 3,2V hasta que se vacía, por lo que no requiere un circuito de regulación del voltaje.

Voltaje	3,20, 3,30V nominal; rango de operación habitual: 2,5–3,65V/celda
Capacidad Específica	90–120Wh/kg
Carga (C-ratio)	1C habitualmente, carga a 3.65V; tiempo de carga 3h
Descarga (C-ratio)	1C, 25C en algunas celdas; pulsos de 40 ^a durante 2s; desconexión en 2,5V (menos de 2V puede causar daños)
Ciclos de vida¹	2000-7000 (dependiendo de la temperatura y la DOD ²)
Temperatura límite	270°C (518°F) (Batería muy segura)
Aplicaciones	Maquinas portátiles y estacionarias que requieran grandes corrientes y durabilidad.

Tabla 11 Especificaciones de las baterías de Litio LiFePO₄

¹ Los ciclos de vida corresponden al número de descargas completas que se pueden realizar hasta que la capacidad de la batería se reduce hasta el 80% de su capacidad original.

² DOD: Depth of Discharge, es la profundidad de descarga de la batería y se mide en %. Las baterías nunca se descargan al 100% porque se dañarían. Existe también el término opuesto: State of Charge (SoC) que indica la carga disponible en la batería. DOD+SOC=1

Celdas seleccionadas: GWL/Power LFP26650



Ilustración 24 Celda GWL/Power LFP26650 [30]

Ciclos de vida (con corrientes de descarga de 0,2C y una DoD de 100%)	2000 ciclos
Voltaje Nominal	3,2V
Capacidad Nominal	3000 mAh
Máxima corriente de descarga	9A
Tiempo de Carga (con un corriente de 0,5C)	120 minutos
Temperatura de trabajo	-30/+60°C
Masa	83g
Precio	3,16 \$

Tabla 12 Especificaciones de las celdas LFP26650 [30]

Para componer la batería se usan 26 celdas (3.2V 3Ah, 3.16\$), dispuestas una serie de 13 parejas de 2 celdas en paralelo, obteniendo las siguientes especificaciones:

$$Vt = 3.2 \cdot 13 = 41,6V$$

$$C = 3 \cdot 2 = 6Ah$$

$$E = Vt \cdot C = 248,6 Wh$$

$$\text{Precio total} = 3,16 \cdot 26 = 82,16 \$$$

$$\text{Masa} = 0.083 \cdot 26 = 2,158 \text{ Kg}$$

$$\text{Corriente de descarga Máxima} = 2 \cdot 9 = 18 \text{ A}$$

Ahora que sabemos la energía que es capaz de suministrar la batería, hay que comprobar que sea suficiente para alimentar al motor:

Conociendo la constante de par: 0,115 Nm/A:

$$18 \text{ A} \cdot 0,115 \text{ Nm/A} = 2,07 \text{ Nm}$$

Vemos que queda por debajo de los 2,5 Nm del pico de par del motor. Por lo que habrá que configurar el BMS para limitar el corriente de descarga y evitar poner las baterías fuera de su rango de funcionamiento.

Para aumentar la duración y rendimiento de las celdas es necesario implementar un sistema de balanceo BMS (Battery Management System) que mantendrá todas las celdas al mismo voltaje mediante pequeñas correcciones de intensidad. Esto evita que una celda que se descarga más rápido (porque las celdas nunca son idénticas), alcance una tensión demasiado baja. Dicho balanceo es imprescindible para las baterías basadas en litio ya que son poco tolerantes a las sobrecargas. Existen distintos tipos de BMS acorde a cada tipo de química, ya que las condiciones de carga cambian de unas a otras.

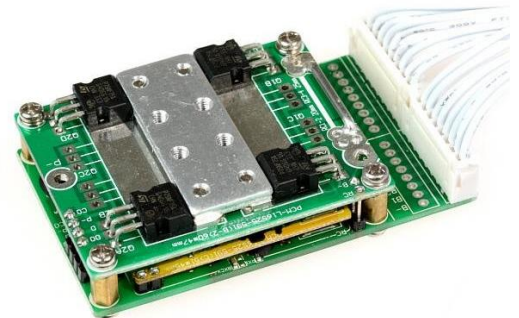


Ilustración 25: BMS seleccionado [31]

Las tecnologías de funcionamiento de los BMS se clasifican básicamente en:

Balanceo Pasivo: únicamente realizado durante la carga, este balanceo consiste en disipar la energía de las baterías que superan cierto límite enviando un corriente del orden de 100mA a una resistencia. Constructivamente son los más sencillos, pero su inconveniente es el rendimiento y que el proceso de balanceo desgasta las celdas ya que se están descargando.

Balanceo Activo: las celdas más cargadas distribuyen el corriente en las que menos lo están. Este funcionamiento no solo tiene lugar en la carga, sino que también durante la descarga, previniendo que alguna celda alcance un voltaje demasiado bajo. Esta construcción implica que todas las celdas deben estar conectadas entre ellas, y por ello es más caro.

Modelo seleccionado: Smart BMS 10S~15S 60A with Bluetooth Android APP

Aunque en la página del producto no se ofrece mucha información, se puede deducir que este sistema permite ajustar el valor del voltaje de balanceo y la corriente de descarga máxima mediante una aplicación Android.

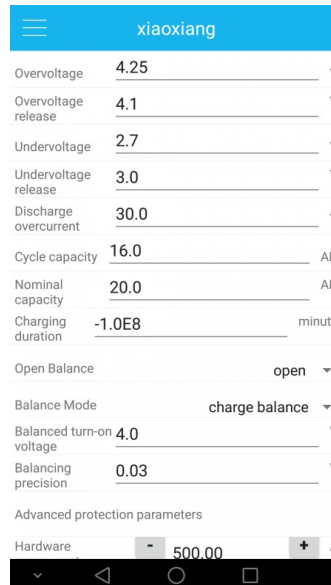


Ilustración 26: captura de pantalla de la APP del BMS [31]

Así entonces, el esquema eléctrico de la batería quedaría de la siguiente manera, donde la carga representa el motor Dunker y el convertidor DCDC que alimenta el Arduino:

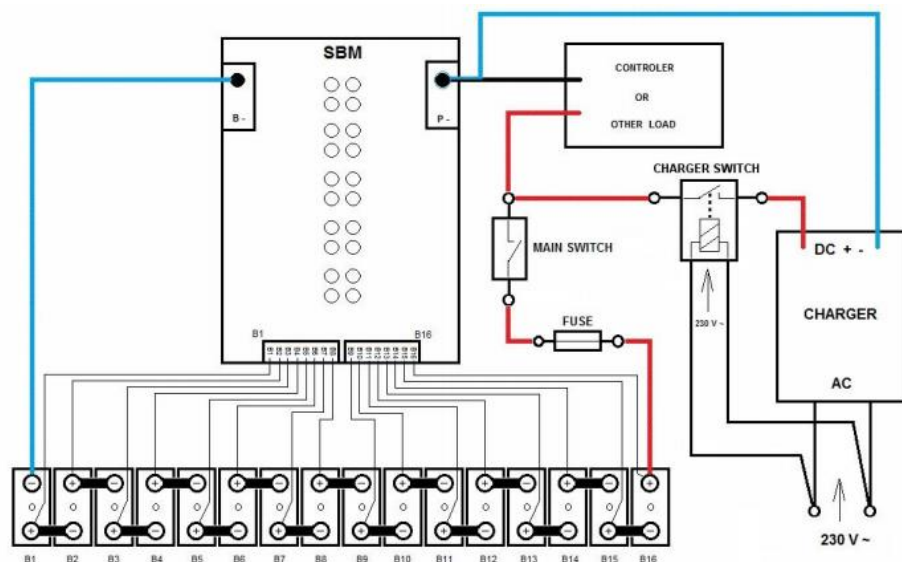


Ilustración 27 Esquema de conexiones del BMS [32]

4.6.4. Cargador externo

Para la tarea de carga se requiere un cargador inteligente que permita hacerlo de manera rápida, estable y sea capaz de determinar cuándo detener el proceso.

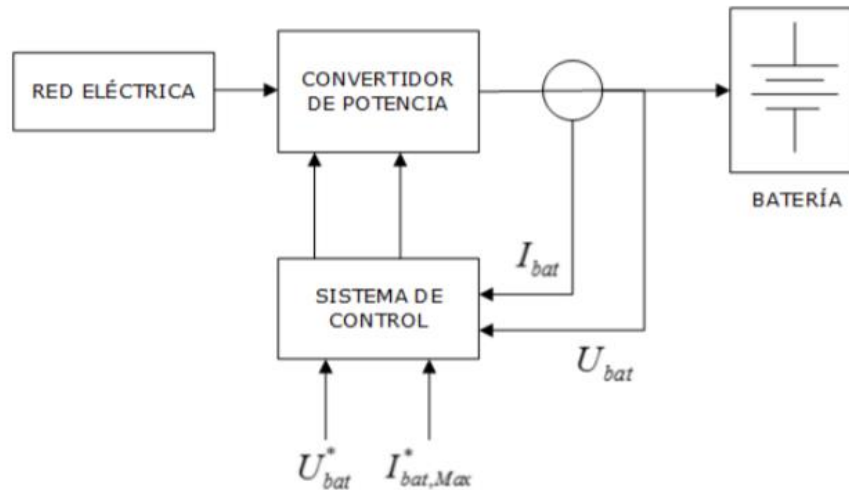


Ilustración 28: esquema genérico de un cargador [33]

Según la aplicación que ocupe, las baterías requieren una u otra metodología de carga:

Carga a tensión constante: es la tecnología universal que sirve para cualquier química de baterías. Está compuesta por un transformador reductor y rectificador. Para el caso de baterías de litio, es necesario elementos de protección.

Carga a corriente constante: se aplica una tensión variable hasta que la carga se completa. El principal inconveniente que presenta es establecer el final del proceso. Para determinarlo se acostumbra a medir el incremento de tensión, el incremento de temperatura y el tiempo de carga. Se usa habitualmente en químicas Ni-Cd o NiMH.

Carga por pulsos: Se basa en cargar la batería mediante pulsos de corriente de una duración determinada. Entre pulsos existe un período de reposo de unos pocos milisegundos para que las reacciones químicas en el interior de las celdas se estabilicen. Este método permite controlar y variar de manera muy precisa la corriente de carga, aumentando o disminuyendo la amplitud de los pulsos de corriente. Existe una variante, llamada Burp Charging o Negative Pulse Charging que consiste en aplicar pulsos de descarga en los períodos de reposo, con el objetivo de despolarizar las celdas y acelerar el proceso de estabilización.

El proceso convencional que optimiza el proceso se llama CCCV (Constant Current, Constant Voltage), que tal como su nombre indica se compone de una fase inicial proporcionando una corriente constante y la fase final con voltaje constante.

Para el caso de las baterías de LiFePO_4 , la primera fase llega hasta el 60% de SOC con un voltaje de 3,65V y posteriormente se mantiene este voltaje, que es el límite para una carga efectiva, mientras el corriente decae asintóticamente. Este método supone una duración de 1 hora para la primera fase 60% de SOC y 2 horas para la segunda 40% de SOC.

Existe también una modalidad de carga rápida forzada que alarga la fase de corriente constante hasta el 95%, aprovechando el hecho que esta química tolera sobrecargas. Se puede considerar completada la carga en el 95% o puede completarse a voltaje constante de 4,2 V, pero el tiempo total nunca será inferior a 2h.

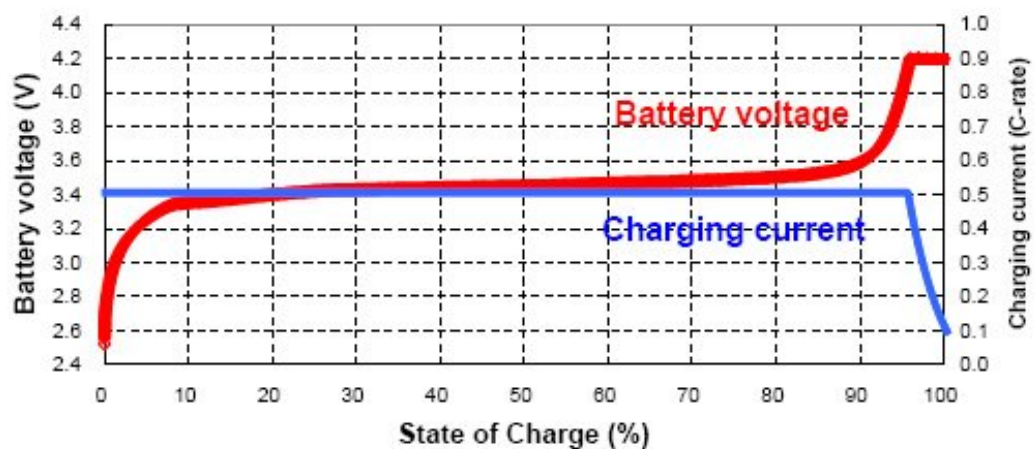


Ilustración 29 Diagrama de carga rápida forzada [33]

Se ha encontrado un cargador inteligente comercial diseñado para las baterías LiFePO_4 con salida regulable que se ajusta al voltaje total de esta:

43.8V4A Cargador 12 S 36 V 38.4 V Lifepo4 Cargador de batería de Salida DC



Ilustración 30 Cargador seleccionado [34]

Sus especificaciones son:

Marca	Wate
Carga Rápida	No
Voltaje de entrada:	100-240 V
Tensión de salida	43.8 V
Corriente de salida	4A
Frecuencia	50-60 HZ

Tabla 13 Especificaciones del cargador [34]

Incluye sistemas de protección contra cortocircuito, sobrecarga, cumpliendo con los siguientes estándares internacionales:

- Seguridad eléctrica: EN60335, IEC60335, UL1310
- EMC estándar: EN55014-1, EN55014-2

4.6.5. Rodamientos

Son un punto clave para que la rueda cumpla su función adecuadamente. Dado que la carga soportada es casi puramente radial, la mejor opción son los rodamientos radiales de bolas, como los que lleva la mayoría de bicicletas. Para un buen mantenimiento es necesario que estos estén sellados lateralmente con bandas de caucho, conservando el aceite lubricante en el interior y previniendo la entrada de suciedad y la formación de óxido.

Es aconsejable que, en su montaje, una de las pistas, la que ve la fuerza girar, esté instalada con juego mientras que la otra debe tener apriete.

A nivel constructivo, los rodamientos solo necesitan una cierta ranura que los mantenga fijos en su posición. Por el lado de la rueda quedan bloqueados por el mismo eje y por el lado de la biela, se transmite la presión de la biela mediante una pequeña pieza especialmente diseñada para este fin.

Se selecciona un rodamiento rígido de bolas de la marca Skf modelo 61905 y se descarga el modelo en 3D.

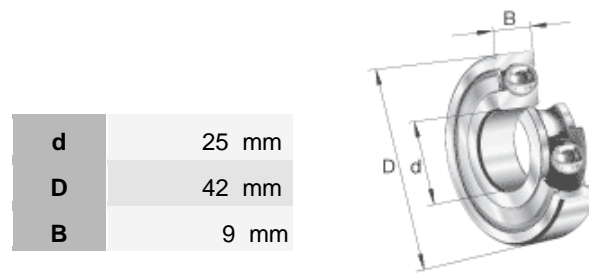


Ilustración 31: Esquema y dimensiones del modelo seleccionado [35]

4.6.1. Pedales

Del mismo modo, los pedales son componentes intercambiables tanto para bicicletas como bicicletas. En este caso es preferible fabricarlos de plástico, puesto que en fase de aprendizaje es fácil golpearlos con ellos.



Ilustración 32 Pedal obtenido de la base Grabcad.com

4.6.2. Rueda

El tamaño de una rueda en un moniciclo es un parámetro sumamente importante, ya que, al ser piñón fijo, marcará directamente la velocidad máxima antes de alcanzar una cadencia de pedaleo incómoda de mantener.

A modo orientativo, se calcula la velocidad que se obtendría en la cadencia óptima de pedaleo (90rpm) según los distintos tamaños de rueda.

Diámetro llanta [Pulgadas]	Diámetro Llanta [cm]	Diámetro completo [cm]	Velocidad [m/s]	Velocidad [Km/h]
24	60,96	68,96	3,25	11,70
26	66,04	74,04	3,49	12,56
29	73,66	81,66	3,85	13,85

Como termino intermedio se selecciona la rueda de 26", considerando que sigue siendo bastante fácil de almacenar y permitiría alcanzar una velocidad máxima de 18km/h.

La rueda usada en el diseño 3D se obtiene de la base de diseños grabcad.com y se le añaden las modificaciones necesarias en el eje, para usarla como rueda de monociclo.



Ilustración 33: rueda seleccionada con el eje modificado

4.6.3. Sillín

Tanto el sillín como la tija son elementos comunes de un monociclo existente, fabricados con plástico duro capaz de resistir duros impactos. El tallo del sillín acaba en una base rectangular, con unos nervios laterales, en los que se atornilla el sillín. Para facilitar la regulación de la altura (imprescindible para un correcto uso del monociclo), se añade un cierre rápido como los que llevan las bicicletas, fabricado en aluminio.



Ilustración 34: vista inferior del sillón

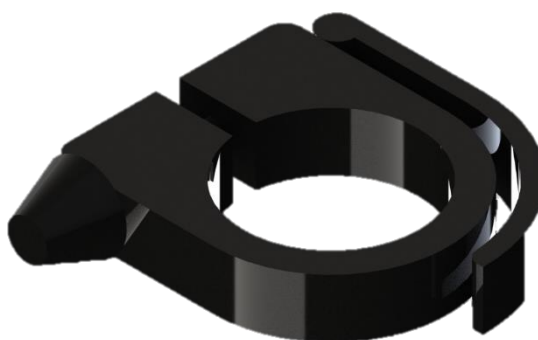


Ilustración 35: cierre del sillón

4.7. Electrónica

4.7.1. Arduino

El sistema de auto-estabilidad requerirá un procesador que calcule el par a entregar al motor con la mayor frecuencia posible y para ello se usa un Arduino Yún, que funciona en lenguaje Python y permitiría implementar un controlador PID que realice esta función. Se selecciona este modelo porque dispone de un gran número de entradas y salidas, necesarias para conectar el sensor giroscópico y las lecturas del motor.

Una característica importante del modelo seleccionado es que tiene conectividad Wifi, lo que

permitirá por un lado cargar el software a distancia y por otro obtener un monitoreo de su funcionamiento. Además, la conexión Wifi también servirá para que el usuario pueda conectarse con su Smartphone mediante una aplicación para realizar los ajustes necesarios y obtener información sobre la batería, la distancia recorrida, y otros parámetros.

ARDUINO YÚN

Microcontrolador	ATmega32U4
Voltaje Nominal	5V
Voltaje de trabajo	5 V
Pines Digitales I/O	20
Salida PWM	7
Pines Analógicos I/O	12
DC Current per I/O Pin	40 mA on I/O Pins; 50 mA on 3,3 Pin
Memoria Flash	32 KB (of which 4 KB used by bootloader)
SRAM	2.5 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad Reloj	16 MHz

Ilustración 36: Especificaciones del Arduino Yún [36]

A continuación, se muestra el esquemático del Arduino:

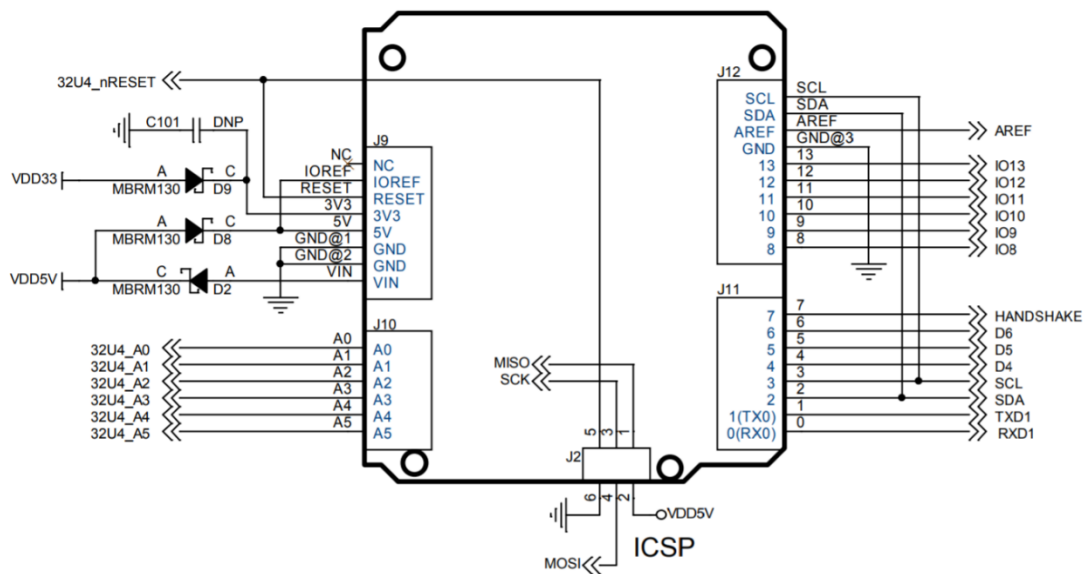


Ilustración 37 Esquema Pin Headers [36]

Y se lista las conexiones con los otros elementos del sistema:

Elemento	Tipo de Pin	Código del pin
Salida 5V del DCDC	Alimentación	VDD5V
Masa	Alimentación	GND
Luz (2 leds blancos)	PWM	PWM (A3,A5)
Luz (2 leds amarillos en serie)	I/O Digital	A1
Giroscopio (6 pines)	I/O Analog	A2,A4,A6,A7,A8,A9
Sensores Hall del motor (3 pines)	I/O Digital	IO10,IO11,IO12
Control del motor	PWM	IO13

Tabla 14 Relación de pines [36]

4.7.2. DC DC

La alimentación del microprocesador requiere 5V que se obtiene interponiendo un conversor DC DC entre la batería y este:

Modelo seleccionado: BIGTREETECH DC-DC Step Down Converter Module LM2596



Tabla 15 DC-DC Seleccionado [37]

Voltaje de Entrada	4 – 40V
Voltaje de Salida	1.3V - 37V
Corriente de Salida (máx.)	2A
Temperatura de Trabajo	-40 : 85°C
Medidas	43x21x14(mm)

Tabla 16 Especificaciones DC-DC [37]

*El voltaje de salida tiene que ser como mínimo 1,5V menor que el de entrada

4.7.3. Giróscopo

La variable de entrada para el sistema de control es la inclinación adelante-atrás, o también conocida como cabeceo, aunque el resto de inclinaciones y aceleraciones también pueden ser de utilidad, por eso se escoge un sensor giroscópico de 6 ejes que proporciona una señal analógica con la velocidad angular y la aceleración para cada uno de los tres ejes.



Ilustración 38 Giróscopo de 6 ejes seleccionado [38]

Para evitar ruido de las vibraciones conviene fijarlo directamente en la horquilla, pero si no fuera suficiente, habría que implementar un filtro pasa-bajos.

4.7.4. Acelerador

Para las primeras pruebas se propone incluir un potenciómetro reostático que permita controlar directamente el par motor. Este será independiente al monociclo y estará conectado por cable.

Un mando del juego Scalextric es un control analógico que contiene un potenciómetro reostático y se puede encontrar por 15 €.



Ilustración 39: mando Scalextric estándar. [39]

Este funciona como un divisor de tensión variable tal como se indica en la figura:

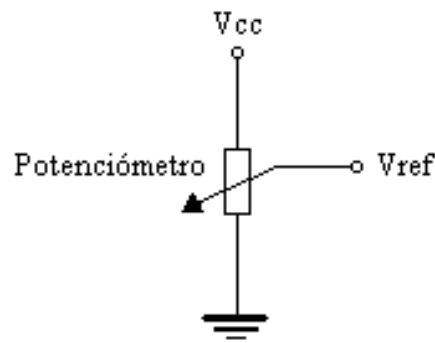


Ilustración 40 Esquema del mando reostático

4.8. Diseño de piezas

Para ensamblar todos los componentes es necesario crear algunas piezas desde cero:

4.8.1. Caja de la batería

Para el ensamblaje se decide apostar por un concepto nuevo, con el objetivo de garantizar al mismo tiempo una buena refrigeración de las celdas y la estanqueidad del conjunto. La construcción es de tipo sándwich, donde solo se aíslan los extremos de las celdas mediante juntas de goma a presión, dejando la mayor parte del cuerpo expuesto al aire. En el nivel inferior se alojan 16 celdas y en el superior 12.

Tanto la estructura como las bandas de goma se fabrican mediante impresión 3D:

- Estructura: Material PLA con posterior tratamiento superficial para lograr la impermeabilización máxima.
- Banda de estanqueidad: Material TangoPlus, con características muy similares a la silicona y el caucho, ideal para sellado.
- Los contactos de las celdas se realizan por soldadura por puntos con tiras de níquel, tal como se indica en la figura:

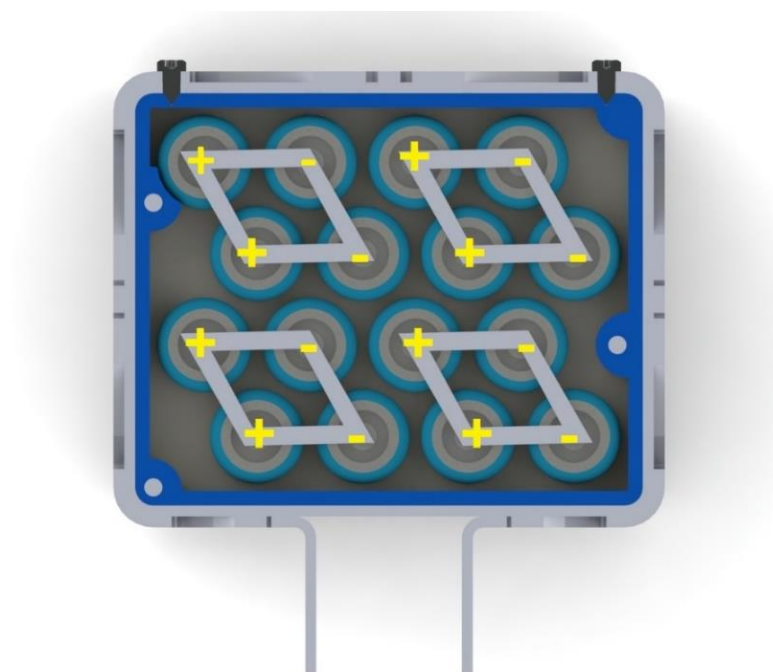


Ilustración 41 Conexiones de níquel entre las celdas

Las barras que unen las distintas placas de la batería son barras roscadas, de manera que con tuercas se mantiene la presión de cada capa de material.

El enganche a la estructura se consigue con una placa de aluminio que abraza perimetralmente la caja de plástico central y esta se atornilla en el soporte a la horquilla. Para ahorrar en material y peso se le realiza un vaciado con sus respectivos redondeos interiores.

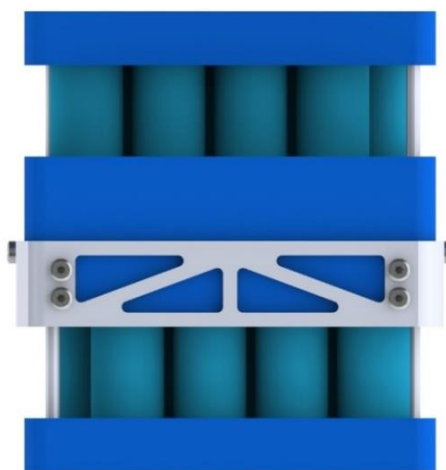


Ilustración 42 Vista Frontal de la caja de la batería

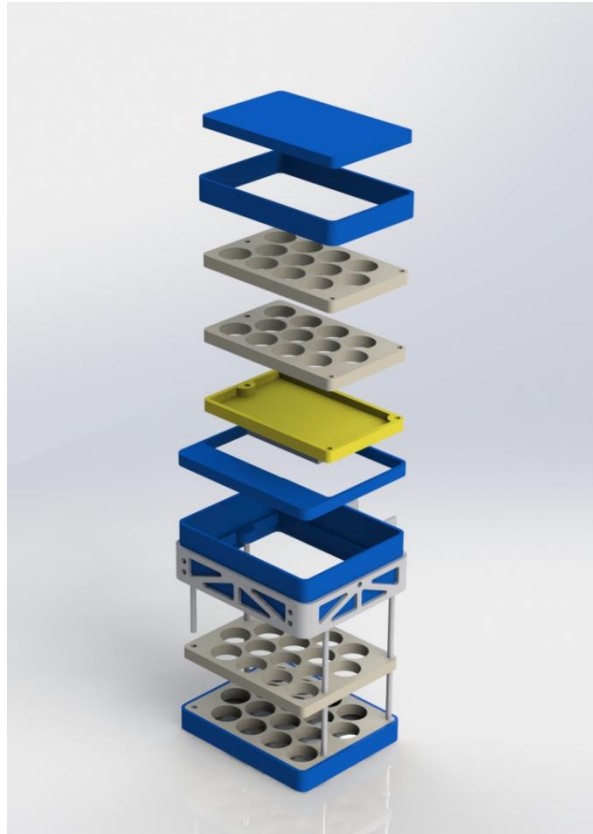


Ilustración 43: Vista explosionada de la caja de la batería

4.8.1. Abrazadera motor-reductor

Esta es una pieza compleja que requiere varias fases de doblado en chapa, mecanizado y soldadura en aluminio.

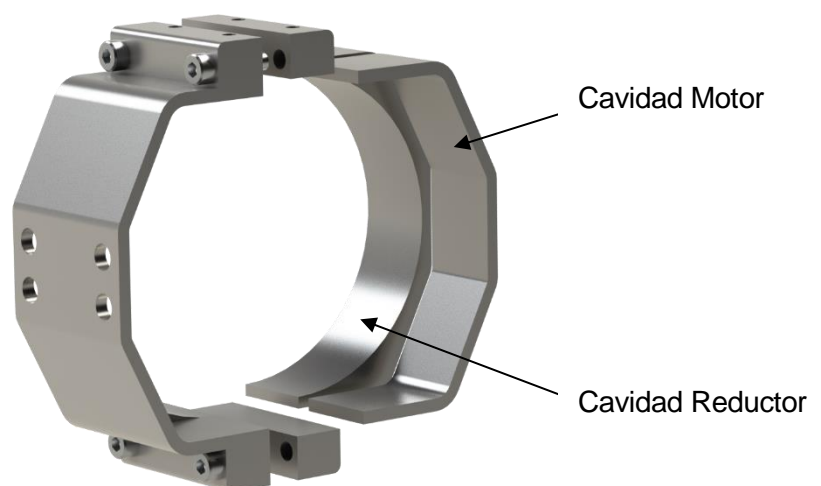


Ilustración 44 Detalle de la abrazadera motor-reductor

El motor y el reductor son sujetos perimetralmente por las dos piezas mostradas en la ilustración 20. La pieza de la izquierda va anclada por 4 tornillos a la horquilla. La pieza de la derecha, que se muestra ligeramente explosionada, es casi simétrica a la de la izquierda con la diferencia que no tiene las 4 cavidades para el anclaje a la horquilla. También se pueden diferenciar las dos formas interiores, la circular para el reductor, y la hexagonal para el motor.

La forma de obtener este bloque sería mecanizando por separado los dos perfiles diferentes (el del motor y el del reductor), soldarlos, añadir los cierres inferior y superior, y finalmente mediante corte laser dividir las dos mitades.



Ilustración 45: pieza intermedia, perfil del motor

Para darle más rigidez a la unión se acoplan mediante soldadura unas “orejas” de chapa en la parte superior, que se atornillaran lateralmente en el cubo de soporte principal.

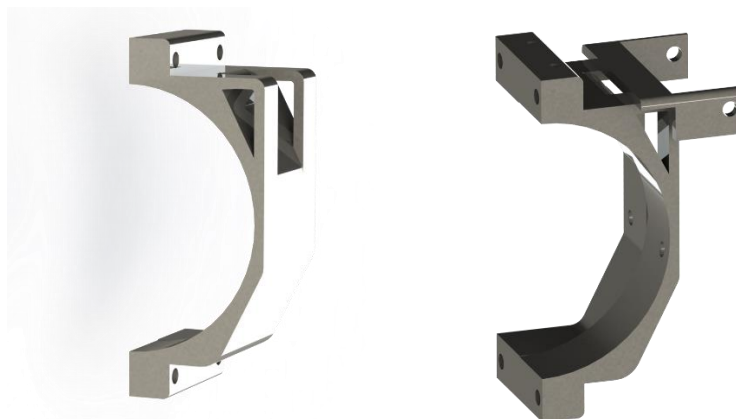


Ilustración 46 (izquierda): pieza intermedia

Ilustración 47 (derecha): pieza final

Encima de la abrazadera van situados el convertidor DC-DC y la placa Arduino dentro de una caja de plástico, apoyados sobre una placa de aluminio perforada.

A partir del volumen medido en SolidWorks y la densidad del aluminio ($2698,4 \text{ kg/m}^3$) se calcula la masa:

Volumen	$6,906 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
Material	Aluminio
Masa	0,186 kg

4.8.2. Soporte horquilla-batería-motor

Se utiliza el mismo punto de apoyo para anclar la batería y el motor a la horquilla, de manera que queda una distribución compacta y los pesos se equilibren. Al mismo tiempo interesa que ambos estén tan abajo como sea posible para mantener el centro de gravedad bajo.

Se trata de un cubo dividido en dos partes con el agujero para abrazar la horquilla. El ensamblaje consistiría en atornillar las dos mitades a la horquilla mediante 4 tornillos. La parte inferior reposa en la bifurcación de la horquilla.

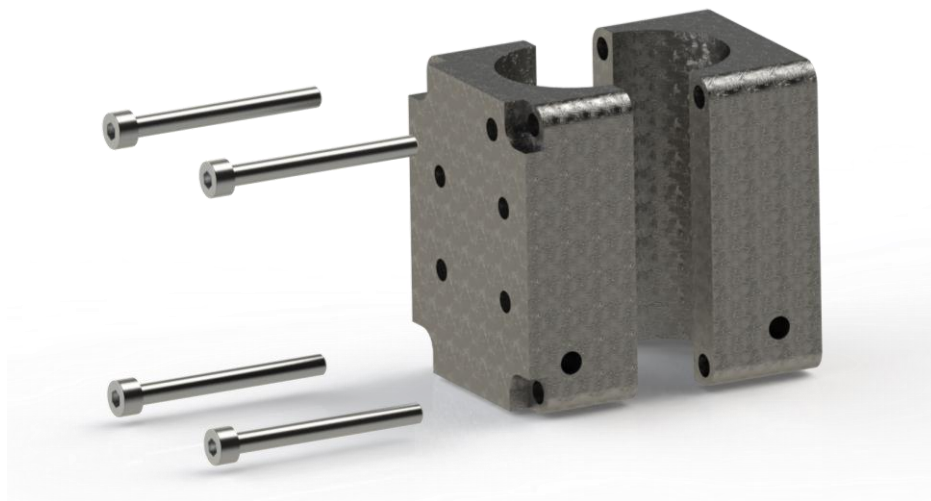


Ilustración 48: Unión entre la horquilla y los componentes eléctricos

Volumen	$7,968 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
Material	Aluminio
Masa	0,215 kg

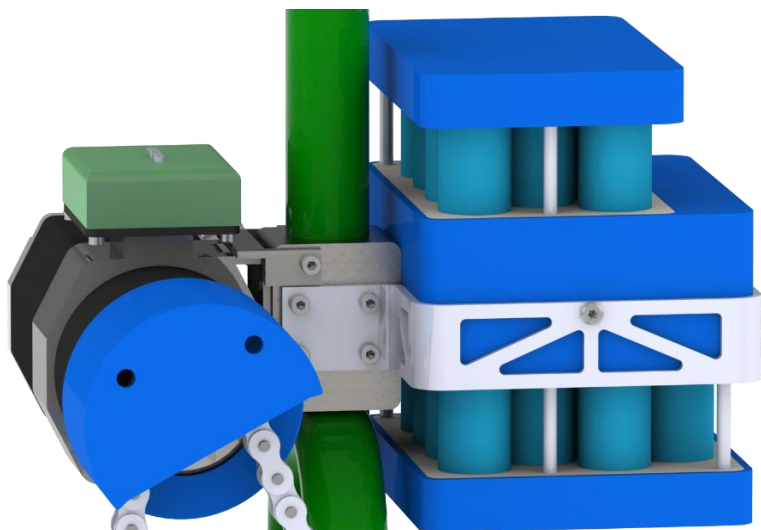


Ilustración 49: vista en detalle del soporte batería-motor

El motor se une al soporte mediante una abrazadera que tiene el mismo perfil. Esta abrazadera al mismo tiempo esta soldada a la que sostendrá el reductor. El conjunto esta dividido por un plano vertical y se unen con 4 tornillos localizados en las partes inferior y superior.

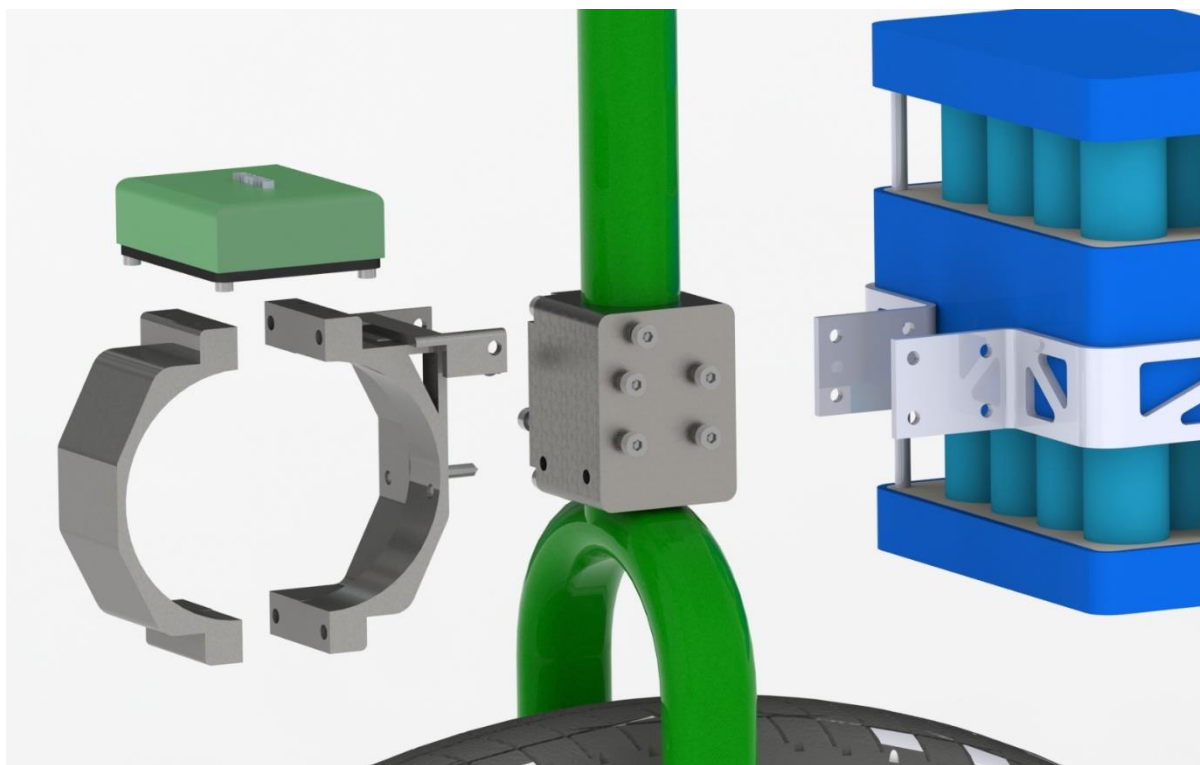


Ilustración 50: explosión soporte motor-batería

Aunque parezca que el motor y la batería estén expuestos a golpearse en caso de que el

monociclo caiga en el suelo, los pedales y el sillín serían los que impactarían antes. Las líneas de las siguientes imágenes unen los posibles puntos de impacto, viendo que ningún componente eléctrico sobrepasa esta línea.

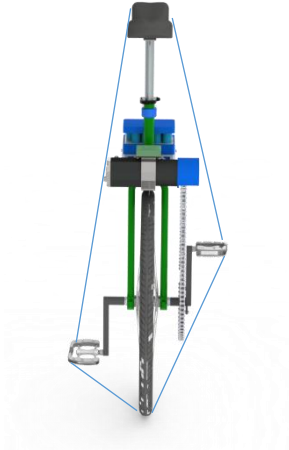


Ilustración 51: vista frontal

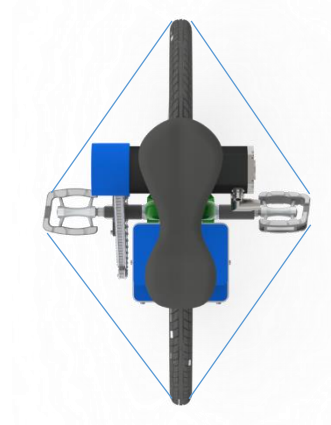


Ilustración 52: vista zenital

4.8.3. Protector plato

Para evitar que el usuario pueda hacerse daño al tocar sin querer el plato que va unido al reductor, se propone una cobertura de plástico que iría atornillada en las roscas que el reductor ya dispone. Para poder acceder a aquellos tornillos se disponen dos agujeros en la parte exterior de la cobertura. El material de fabricación es PLA al igual que en la batería.

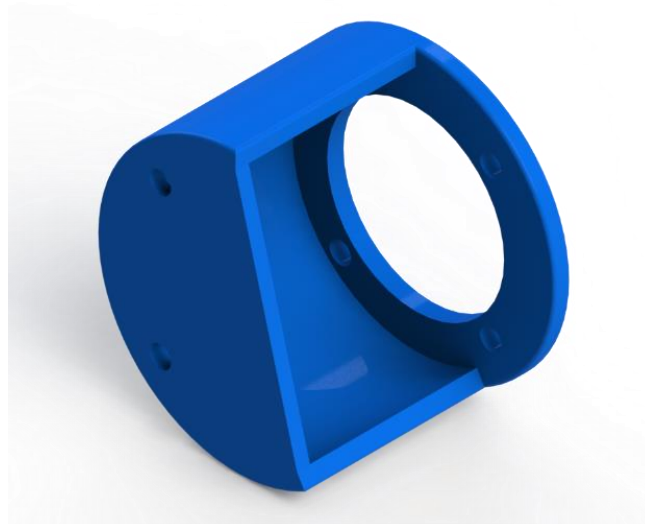


Ilustración 53: protector del plato pequeño

4.8.4. Bielas

Las bielas diseñadas son muy parecidas a unas convencionales de bicicleta con un encaje cuadrado, con una ligera conicidad que mejora la sujeción al atornillarla al eje. Es ligeramente más alargado de lo normal para permitir la correcta alineación entre los platos. Es común que en la junta del pedalier con la biela, si está hecha de aluminio, se produzcan deformaciones progresivas que hacen bailar el pedal hasta que finalmente cae. Por eso el material seleccionado es el acero, que cuenta con una dureza mayor.

Este tipo de piezas se suelen obtener mediante la forja en los procesos en serie, pero para el caso de un prototipo sería más adecuado el mecanizado.



Ilustración 54: biela izquierda

Las dos bielas se diferencian por las dos alas con 3 agujeros que incorpora para acoplar y mantener recto el plato.



Ilustración 55: biela derecha con soporte para acoplar el plato

4.8.5. Platos

Los modelos de platos, de la marca Iwis, son descargados de la web www.tracepartsonline.net, cumplen el standard ISO 08B, con media pulgada de paso, y son de 9 y 54 dientes respectivamente. Se requiere un posterior proceso de mecanizado para adaptarlos.

El plato pequeño se tiene que ampliar el agujero del eje y debe incorporar una ranura fresada para acoplarse a la chaveta del reductor:

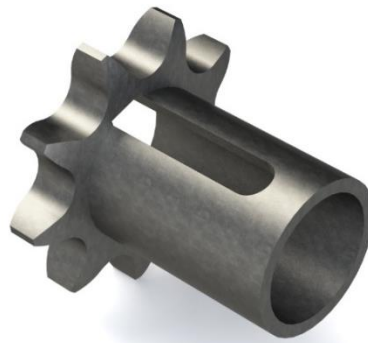


Ilustración 56: plato de 9 dientes [40]

En el plato grande se practican unos cortes con láser para reducir peso innecesario y unos agujeros con rosca para el acoplamiento con la biela.



Ilustración 57: plato de 54 dientes [40]

4.8.1. Horquilla

Tomando como referencia modelos ya existentes de monociclo, se opta por una geometría muy simplificada para facilitar la construcción: estructura tubular de acero de 30mm de diámetro exterior y 3mm de grosor. La altura desde el eje de la rueda hasta la horquilla es de 0,6 m. En la parte inferior de la horquilla se encuentran las piezas que sujetan el cojinete, que serían también mecanizadas en acero y soldadas en el extremo. En la parte superior se encuentra una ranura que permite apretar el sillín mediante el cierre de palanca.

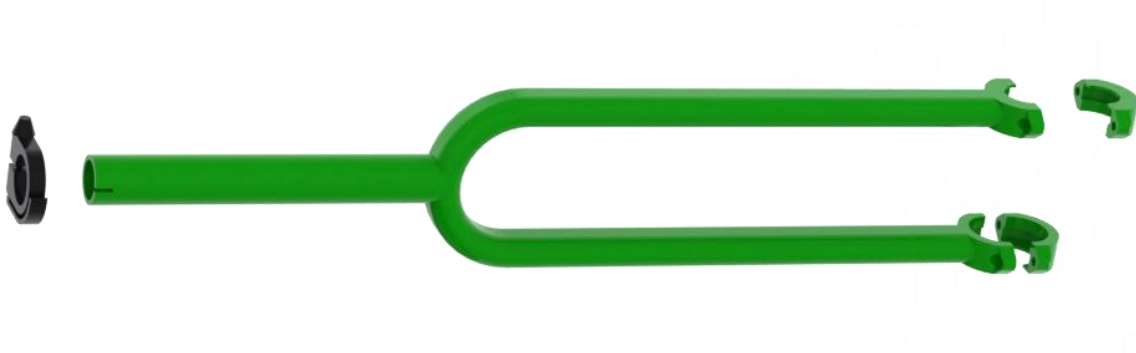


Ilustración 58: vista general de la horquilla

4.8.2. Encaje de la rueda

Por la parte inferior otra pieza simétrica encierra el rodamiento sujetando la rueda.

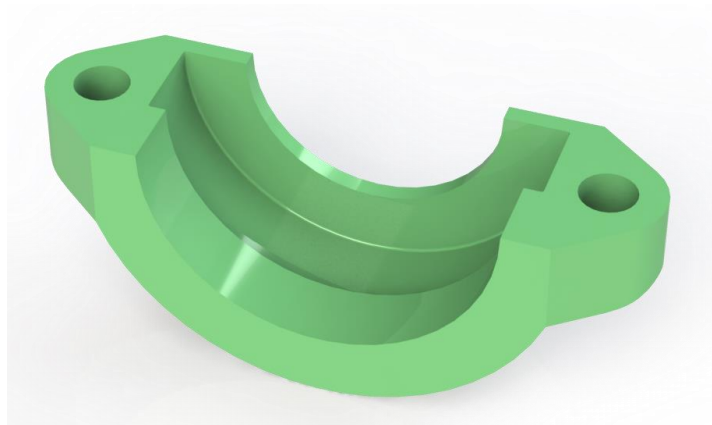


Ilustración 59: cierre inferior

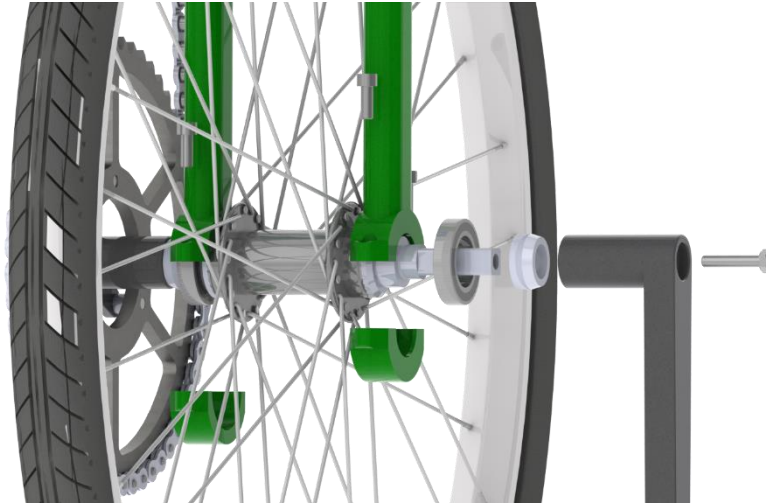


Ilustración 60: detalle del acoplamiento del eje

Se diseña una pieza auxiliar que se sitúa entre la biela y el rodamiento con el fin de que este quede bien sujeto.



Ilustración 61: pieza auxiliar de sujeción del rodamiento

4.8.3. Luz Frontal

Se ha diseñado una luz muy sencilla compuesta de 4 leds, una cubierta transparente, y el cuerpo con forma de anillo para su colocación encima de la horquilla. Se decide combinar 2 leds blancos con 2 amarillos para obtener una luz más cálida que si solo tuviera leds blancos.

Teniendo en cuenta que los leds funcionan a los siguientes voltajes:

Led Blanco	3,2 – 3,6 V
Led Amarillo	2,1 – 2,4 V

Se pueden conectar los amarillos en serie a una salida digital de 5 V del Arduino, mientras que los blancos se pueden conectar a la salida de 3,3V. La corriente nominal de los leds es de 20 mA, por lo que, en el caso de los dos leds amarillos en serie, que consumirán 20 mA en total no se supera el límite de corriente de 50 mA que tiene cada salida digital de 5 V. Los

leds blancos, pueden también conectarse a una misma salida de 3,3 V, quedando justo en los 40 mA que es el límite de estas.

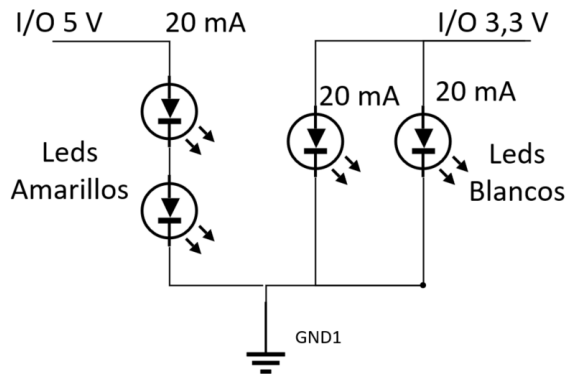


Ilustración 62: esquema de conexión de los leds



Ilustración 63: luz frontal

4.9. Estimación de las especificaciones obtenidas

Con todo lo anterior, con la información de masas que da SolidWorks y tomando referencias de un monociclo existente se obtienen las siguientes masas:

Monociclo Standard de Acero 26"	5,9
Celdas batería	2,158
Caja batería	0,745
Motor	1,6
Reductor	1,5
Platos y cadena	0,2
Abrazadera motor	0,186
Soporte motor-batería	0,215
Total	12,501

Tabla 17: cálculo de masa [kg]

Autonomía

Es muy difícil calcular la autonomía que se conseguirá ya que ésta depende de muchos factores, como la velocidad, el rendimiento de los sistemas, etc. En base a las especificaciones del Fastwheel EVA Pro, un monorueda comercial, se da una cota mínima de la autonomía esperada.

Precio	600 €
Peso	12,5 Kg
Capacidad de la batería	260 Wh
Autonomía Máx.	32 km
Velocidad Máx.	20 km/h

Tabla 18: especificaciones del Fastwheel EVA Pro

Se estima que el monociclo desarrollado, que tiene una batería de capacidad de 246 Wh i masa 12,501 kg, debería tener una autonomía no inferior a 50km, en el supuesto que el esfuerzo del usuario sea igual al del motor.

5. Presupuesto

Se ha dividido el presupuesto en dos partes: primero el coste de ingeniería que supondría la realización del proyecto en el supuesto que se hubiera realizado con fines comerciales; segundo, un presupuesto orientativo del coste de fabricación del prototipo. No hay que olvidar que el coste de una unidad producida en serie es mucho menor que la de un prototipo.

Concepto	Dedicación	Precio por hora	Coste	
Búsqueda de información	60	25		1500
Diseño conceptual	40	25		1000
Modelado 3D	120	40		4800
Memoria	80	20		1600
Subtotal	300			8900
Software	Licencia	Precio alquiler	Duración	Coste
Solidworks Standard	6600	1010	3 meses	1010
Microsoft Office 365 Business		10 €/mes	4 meses	40
Subtotal				1050
Total				9950 €

Tabla 19: presupuesto de ingeniería

Componente	Pieza	Cantidad	Coste unitario		Coste
Motor	Motor BG 75X25 PI, 40V	1	600		600,00
Tranmision	Reductor Dunker PLG 75LL	1	160		160,00
	Plato 9 dientes	1	10,77		10,77
	Plato 54 dientes	1	88,19		88,19
	Cadena	1	12,9		12,90
	Protector	1	0,084		0,08
				Subtotal	271,94
Bateria	Pila 26650..	26	3		68,61
	BMS	1	23		38,88
	Material 3D PLA	0,45	16,45	€/kg	7,41
	Material 3D Tango	0,30	20	€/kg	5,91
	Tiempo impresión	4,00	10	€/h	40,00
	Corte Laser	1,00	0,78	€/h	0,78
				Subtotal	161,59
Horquilla	Tubos de aluminio	1,5	15,08	€/m	22,62
Sillín	Sillín	1	17,9		17,90
	Tallo aluminio	1	19,9		19,90
Soporte Motor Bateria	Aluminio	0,4	1,67	€/kg	0,67
	CNC	60	1	1€/min	60,00
Rueda	Llanta Kris Holm 26"	1	58,9		58,90
	Cubierta	1	21,25		21,25
	Biela de Acero	1	10,5		10,50
	Pedales	1	7,2		7,20
	Eje	1	19,9		19,90
				Subtotal	117,75
Electrónica	Arduino Yun	1	62		62,00
	DC-DC Bigtretech	1	3,24		2,39
	Sensor Giroscópico 6 ejes	1	2,35		2,35
	Mando Scalextric	1	15,99		15,99
				Subtotal	82,73
				Total	1355,11

Tabla 20: presupuesto de fabricación del prototipo

El coste de los procesos de fabricación se ha obtenido de la página web de un ateneo de fabricación de Barcelona.

6. Impacto Ambiental

6.1. Introducción

Todo proyecto que se materialice tiene un impacto sobre el entorno, positivo o negativo que hay que evaluar detenidamente para decidir si es conveniente o no.

Un objetivo de cualquier proyecto debe ser minimizar el impacto ambiental negativo y también intentar compensarlo, como las empresas que plantan un árbol para compensar las emisiones de CO₂ del vehículo que comercializan.

Fomentar energías renovables, la actividad física, reducir el tráfico en las ciudades, incluso la generación de puestos de trabajo, son los impactos positivos que se pretenden con la comercialización del monociclo eléctrico.

6.2. Impacto de la fabricación

6.2.1. Materiales:

La obtención, el transporte y el procesado de los materiales llevan implícito cierto consumo de energía, de agua y de sustancias químicas que pueden contaminar ríos y tierras, afectando la biodiversidad.

- Las baterías de Ion Litio tienen un impacto ambiental muy negativo dado que necesitan cobalto para su fabricación y gran parte de su producción mundial tiene orígenes dudosos relacionados con explotación infantil y pésimas condiciones de los trabajadores. Las baterías seleccionadas (LiFePO₄), en cambio, no contienen ese material, además que su ciclo de vida es mayor.

Por ahora, pese al enorme volumen de baterías de litio que son desechadas, su reciclaje es un proceso difícil, peligroso y casi 5 veces más costoso que la extracción del litio.

- La obtención de materiales como el aluminio y el hierro sigue teniendo una gran huella ecológica, ya sea por la extracción misma, las grandes temperaturas necesarias en su procesado o incluso la energía invertida en el reciclaje de estos.
- Los plásticos empleados en la impresión 3d son biodegradables.

Tan importante es la obtención de los materiales como su disposición y correcto reciclaje. Por eso, todos los materiales empleados son reciclables o bien

biodegradables.

Asimismo, hay que considerar las emisiones de CO₂ a la atmósfera, derivadas tanto del transporte como de procesos de fabricación.

6.3. Impacto del uso

Se espera que el impacto derivado del uso del vehículo diseñado sea generalmente positivo:

- Fomento de la actividad física
- Reducción de emisiones de CO₂ en las ciudades, por la gente que abandone un vehículo de combustión. Desafortunadamente, hasta que las energías renovables tomen más importancia, la mayor parte de la energía de la red sigue proviniendo de combustibles fósiles. Aun así, según estudios realizados, el impacto de los vehículos eléctricos resulta favorable.
- Posible incivismo de quienes lo usen sin respetar la convivencia de los vecinos ni la normativa, como es el caso de Barcelona.
- Posibles accidentes de quien haga un uso temerario e irresponsable.

6.4. Corrección del impacto

A parte de procurar usar las tecnologías y materiales más limpios en la fabricación y comercialización, se puede compensar el consumo de energías no renovables que el monociclo utilizaría invirtiendo directamente parte del precio del producto en la generación de energía renovable.

Conclusiones

Se ha cumplido el objetivo inicial de diseñar un prototipo fabricable. Una exhaustiva búsqueda de tecnologías y componentes ha sido realizada para determinar la mejor solución.

Durante el transcurso del trabajo se ha adquirido un amplio conocimiento de la herramienta SolidWorks que solo la práctica puede aportar.

Comparando con la idea original del proyecto que pretendía abarcar hasta el desarrollo del software de auto estabilización, se puede afirmar que se requieren muchos ingenieros, recursos, conocimiento y organización para llevar a cabo ideas innovadoras como ésta.

Este proyecto me ha motivado a continuar mis estudios para ser capaz de completar todos los aspectos que quedan pendientes y posiblemente construir el mencionado prototipo por mi cuenta.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Emilio Angulo por su apoyo incondicional durante este proyecto. A pesar de no haberle facilitado el seguimiento del proyecto, su experiencia me ha aportado unos conocimientos prácticos muy valiosos.

También quiero agradecer a mi familia, los que han hecho posible que yo esté donde estoy, y a todos los amigos que me han acompañado durante este período especial de mi carrera.



Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Página Oficial de Edd Pratt [<https://www.facebook.com/MrEdPratt>]
- [2] Tienda Monociclos [<http://tienda.monociclos.com/>]
- [3] Ryno Motors [<http://rynomotors.com/>]
- [4] Bombardier Embrio Concept [<https://newatlas.com/embrio-one-wheel-concept/2350/>]
- [5] Uno Dicycle [[https://en.wikipedia.org/wiki/Uno_\(dicycle\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Uno_(dicycle))]
- [6] Fastwheel [<http://fastwheel.es/>]
- [7] Xiaomi Ninebot One [<https://xiaomi-mi.com/electric-scooters/xiaomi-ninebot-mini-self-balancing-scooter-black/>]
- [8] Gauswheel [www.gauswheel.com]
- [9] Uno Bolt [<http://www.unobolt.com>]
- [10] Segway I2 SE [<http://www.segway.es/es/productos/consumo-y-estilo-de-vida/segway-i2-se/>]
- [11] Xiaomi Folding Scooter [<http://www.mi.com/es/mi-electric-scooter/>]
- [12] S-019 Short Board
[https://movefree4you.com/index.php?route=product/product&product_id=10475]
- [13] Bicicleta conceptual Dosug [<http://dosug.md/ru>]
- [14] Motor asíncrono [<http://www.monografias.com/trabajos91/motor-asincrono/motor-asincrono.shtml#ixzz51LqJanDE>]
- [15] Escobillas motor DC [<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/comtat.html>]
- [16] Motores de continua [https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua]
- [17] Motores de continua

- [http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind2/Tema_4/motorcc.html]
- [18] Motores de flujo axial [<https://www.monocicloselectricos.org/sin-categoria/imaneselectroicamnes-permanentes.html>]
- [19] Motor Magnax [<https://www.magnax.com/product>]
- [20] Motor frameless STD [<http://www.sdt drivetechnology.co.uk/torque-motors/>]
- [21] Pulse Width Modulation [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation]
- [22] Motor Hub Brushless [https://keyde.en.alibaba.com/product/841151649-213539664/keyde_hub_motor_e_bike_conversion_kit_with_super_mini_motor_and_light_liion_battery_S230.html]
- [23] GrabCad [<https://grabcad.com/library/golden-motor-250w-geared-hub-motor-for-front-bicyclewheel-minimotor>]
- [24] Sensor de par para bicicleta [<http://www.machinedesign.com/recreation/electric-bike-balances-pedal-and-motor-torque>]
- [25] Motor McClennan HT05005 [<https://www.mclennan.co.uk/product/ht-series-frameless-torque-motors>]
- [26] Motor Bei Kimco [<http://www.beikimco.com/motor-products/brushless-dc/BLDC-brushless-frameless-parts-kit>]
- [27] Motor Dunker [<http://www.dunkermotoren.com/en/products/brushless-dc-motors/detail/885750730104/>]
- [28] Reductor Dunker
[<http://www.dunkermotoren.com/en/products/gearboxes/detail/8887501103/>]
- [29] Comparativa Baterías [<http://www.renobat.eu/es/comunicacion/articulos/1026-comparativa-entre-las-diferentes-baterias-de-litio-lifepo4-la-licoo2-la-limn2o4-y-la-li-nico-o2>]
- [30] Celda LFP26650 [<https://www.ev-power.eu/LiFePO4-small-cells/LFP26650-Rechargeable-cell-3-2V-3Ah-LiFePO4.html>]
- [31] BMS [<https://bmsbattery.com/bmspcm/833-smart-bms-10s13s-60a-with-blue-tooth-android-or-ios-app.html>]
- [32] BMS previamente seleccionado [<https://www.ev-power.eu/Battery-Management/Simple-Battery-Management-Board-16-cells-48V-10A2.html#tab1>]

- [33] Lluís Franch Sánchez, *Disseny i Construcció d'un Battery Pack i Carregador per a un Monoplaça Formula Sae*, 2016
- [34] Cargador externo [<https://es.aliexpress.com/item/43-8V4A-Lifepo4-battery-charger-12S-43-8V-Lifepo4-battery-charger-with-43-8v4a-Lifepo4-battery/32763779969.html>]
- [35] Rodamientos Schaeffler [<http://medias.schaeffler.de/medias/es!hp.ec.br/619..-2Z>]
- [36] Arduino Yun [<https://store.arduino.cc/arduino-yun>]
- [37] Conversor DC-DC LM2596 [<https://es.aliexpress.com/item/10-PCS-DC-DC-Step-Down-Converter-Module-LM2596-DC-4-0-40-to-1...>]
- [38] Giróscopo [http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES...]
- [39] Mando Scalextric [<https://www.drim.es/>]
- [40] Modelos de los platos [<http://www.tracepartsonline.net>]

Bibliografía complementaria

Ministry of Housing, Spatial Planning and the environment communications directorate of the Netherlands, *Eco-indicator 99 Manual for Designers*, 2001

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology 2010, *Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles, Technology and Society Laboratory*.

P. R. Upadhyay and K. R. Rajagopal, *Comparison of performance of the axial-field and radial-field permanent magnet brushless direct current motors using computer aided design and finite element methods*.

[<http://www.tecnocio.com/blog/legislacion-y-normas-circulacion-sobre-patinetes-electricos-y-monociclos-en-barcelona/>]

[<https://www.minipitbikes.es/blog/normativa-de-circulacion-de-patinetes-electricos-y-monociclos/>]

[<http://www.instructables.com/id/Electric-unicycle-Arduino-DIY/>]

[<http://www.renobat.eu/es/comunicacion/articulos/1026-comparativa-entre-las-diferentes-baterias-de-litio-lifepo4-la-licoo2-la-limn2o4-y-la-li-nico-o2>]

[http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion]

[<http://www.stratasys.com/es/materiales/polyjet/tipo-caucho>]

[<http://www.lupeon.com/impresion-3d/materiales-de-impresion>]

[<https://www.powerstream.com/LLLF.htm>]